

GANOT — MANEUVRIER

De la Física

Tratado Elemental

DE FÍSICA



PARIS
LIBRERÍA DE LA V^{ta} DE CHLBOURRY

TRATADO ELEMENTAL
DE FÍSICA

GANOT—MANEUVRIER

TRATADO ELEMENTAL

DE FÍSICA

VIGÉSIMA QUINTA EDICIÓN

ENTERAMENTE REFUNDIDA

Conforme á los programas oficiales de segunda enseñanza
y á los más recientes descubrimientos y aplicaciones de la Ciencia

POR

GEORGES MANEUVRIER

Profesor de Ciencias físicas en la Escuela Nacional de Bellas Artes, etc.

CON LA COLABORACIÓN DE

MARCEL BILLARD

Profesor en el Liceo Carlomagno.

ESTA OBRA CONTIENE 1050 GRABADOS EN EL TEXTO
Y 1 LAMINA DE COLOR



LIBRERÍA DE LA V^{da} DE C. BOURET
23, RUE VISCONTI, 23

LIBRERÍA DE HACHETTE Y C^{ta}
79, BOUL. SAINT-GERMAIN, 79

1913

Propiedad del Editor.

~~~~~  
Quedan asegurados los derechos de propiedad  
conforme a la ley.  
~~~~~

TRATADO ELEMENTAL DE FÍSICA

LIBRO I

MATERIA, MOVIMIENTO Y FUERZAS

CAPÍTULO I

NOCIONES PRELIMINARES.

PROPIEDADES GENERALES DE LA MATERIA.

MEDIDA DE LONGITUDES

1. **Estados físicos de los cuerpos.** — La materia impresiona nuestros sentidos ante todo por la diversidad de sus aspectos. Manifiéstasenos bajo tres tipos distintos, que se llaman *estados físicos* de los cuerpos. Son el *estado sólido*, el *líquido* y el *gaseoso*.

En el estado sólido, tienen los cuerpos forma y volumen perfectamente determinados. Tales son las maderas, las piedras, los metales.

Ofrecen más o menos resistencia no sólo a la ruptura, sino también a los simples cambios de lugar de sus partes. Esta propiedad, característica del estado sólido, se denomina *cohesión*.

Los *líquidos* tienen también un volumen determinado; pero carecen de forma propia, tomando la del recipiente que los contiene. El agua es el más conocido de estos cuerpos. En estado gaseoso, los cuerpos ya no tienen forma ni volumen propios y tienden constantemente a ocupar todo el espacio abierto ante ellos : se les llama *gases*. Así es el aire atmosférico.

Encerremos, por ejemplo, en un cilindro de cristal (fig. 1), debajo de un pistón, un volumen determinado de aire o cualquier otro gas. Si levantamos el pistón, el gas se esparce por todo el volumen que bajo éste existe. Esta propiedad se indica diciendo que los gases son *expansibles*. Inversamente, haciendo descender el pistón, disminuye el volumen del gas, lo cual se expresa diciendo que los gases son *compresibles*.

Si, finalmente, después de haber comprimido el gas, ejerciendo una pequeña presión sobre el pistón, abandonamos éste, el gas lo rechaza y el pistón vuelve a su posición primitiva; por lo cual se dice que los gases son *elásticos*.

El estado líquido es intermedio respecto de los otros dos. Las partículas líquidas no parecen atraerse como las sólidas ni rechazarse como las gaseosas, resbalan fácilmente unas sobre otras, de modo que pueden mezclarse sin esfuerzo y cambiar de forma a voluntad sin modificación en el volumen. Esta movilidad de las partículas, resultado de la falta de cohesión, se denomina *fluidéz*. Como dicha propiedad es común a los líquidos y a los gases, se les ha dado el nombre general de *flúidos*.

Los líquidos son muy poco compresibles: hay que hacer *mucho esfuerzo* para reducir *muy poco* su volumen (225). Pero son tan elásticos como los gases.

OBSERVACIONES. -- 1º Un mismo cuerpo puede existir sucesivamente en estos tres estados. El agua, por ejemplo, ordinariamente líquida, existe también en estado sólido, en forma de hielo, y en estado gaseoso en forma de vapor. Del mismo modo se ha podido reducir a estos tres estados la mayor parte de los cuerpos, con más o menos dificultad.

2º Los tres estados físicos que acabamos de definir son conforme a lo dicho, tipos distintos; pero relacionados entre sí por una serie de eslabones intermedios. Así, los líquidos viscosos, como las *conservas* y *jaleas*, pasan gradualmente del estado líquido al sólido. Más adelante, veremos que los gases no se diferencian esencialmente de

los líquidos cuando alcanzan cierto grado de compresión.

2. **Divisibilidad.** — Llámase de este modo la propiedad que poseen todos los cuerpos de poder ser convertidos en partículas *infinitamente* pequeñas, sin perder por esto ninguna de las propiedades características de su substancia: es la *divisibilidad* de la materia.

Esta división puede efectuarse en los sólidos por gran número de procedimientos que nos suministran las artes mecánicas y las ciencias físicas. Así, sóplanse objetos de vidrio de 1 *micrón** de grueso; estíranse alambres de platino de 0,8 μ de diámetro; laminanse panes de oro de 0,4 μ de grueso; y se cubren alambres de plata con una capa de oro que no pasa de 0,04 μ .

Cuando se sopla una pompa de jabón se ve aparecer, al momento de romperse, manchas negras cuyo espesor es de 0,01 μ .

Otro ejemplo de extrema divisibilidad de la materia, sin discontinuación. Los experimentos han demostrado que un fragmento de

* Designase, generalmente, con el nombre de *micrón* a la millonésima parte del metro, o a la milésima parte del milímetro. El *micrón* se representa por la letra griega μ .



Fig. 1.

alcáfor echado en la superficie del agua da vueltas y se mueve en todas direcciones, y que una gota de aceite derramada en el agua impide ese movimiento. Pues bien, lord Rayleigh ha probado que el espesor de la gota de aceite eficaz es de unos 0,002 μ .

3. **Átomos y moléculas.** — Esto no obstante, se admite que la división de la materia *no es infinita*. Suponiendo que se emplearan procedimientos de división mucho más perfectos que los de que hoy disponemos, se debería llegar a un límite infranqueable, el *átomo*, que se puede concebir como un volumen de figura determinada que la acción de las fuerzas naturales no puede dividir o alterar.

Llámase *molécula* un grupo de átomos que representa la partícula más pequeña de una substancia químicamente definida que puede existir en el estado individual y aislado.

Ni la molécula ni el átomo son perceptibles por nuestros sentidos ni por nuestros aparatos de medición. No obstante, si se admite que los gases están formados por moléculas en movimiento continuo (teoría cinética), se deduce que el diámetro de las moléculas gaseosas, supuestas esféricas, se halla comprendido entre $1/1000$ y $1/10000$ de μ . Los recientes experimentos de M. J. Perrin han hecho pensar en que hay unas 70×10^{22} moléculas en el *volumen molecular* de cualquier gas ($22,30$ a 0° bajo la presión atmosférica normal), lo cual da unos 35 millares de millones por milímetro cúbico. A pesar del enorme valor de este número, la gran compresibilidad de los gases demuestra que las moléculas están muy separadas unas de otras.

4. **Fenómenos. — Física y Química.** — Se da el nombre de *fenómeno* a todo cambio que se produce en los cuerpos de la naturaleza y nos es revelado por nuestros sentidos, ya solos, ya ayudados por aparatos que aumentan su potencia.

La *Física* estudia, en particular, los fenómenos comunes a todos los cuerpos o a una clase de cuerpos, por ejemplo: la gravedad, la caída de los cuerpos, la electrización, la fusión de sólidos, la vaporización de líquidos. La *Química* estudia, especialmente, las propiedades particulares de los cuerpos y su acción mutua. Entre ambas clases de fenómenos, no existe ninguna diferencia esencial.

5. **Magnitudes.** — Se llama *magnitud* todo lo que es susceptible de aumento o disminución.

En los fenómenos que estudia la Física, intervienen las *magnitudes*. Así, cuando se calienta una barra metálica, se alarga. Dícese que se *dilata*. La longitud y la temperatura de la barra son dos magnitudes.

Todo fenómeno se caracteriza por la variación de ciertas magnitudes.

6. **Leyes físicas. — Objeto de la Física.** — Una *ley física* es la relación entre las magnitudes que figuran en un fenómeno.

La investigación de las leyes físicas es de la mayor importancia, tanto desde el punto de vista de las aplicaciones de la ciencia, como desde el puramente especulativo. En efecto, el simple conocimiento cualitativo de un fenómeno sólo da de él una idea muy incompleta y que no

se presta a aplicaciones prácticas. Por ejemplo : no basta saber que una barra de hierro se estira, al calentarse; sino que se debe determinar cuánto aumenta por una elevación de temperatura dada; es decir, que se necesita conocer la *ley de dilatación* del hierro.

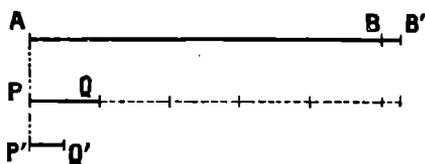


Fig. 2.

Todos los fenómenos que hemos de estudiar se prestan a análogas consideraciones : por consiguiente, el objeto de la Física es, en realidad, la indagación de las leyes de los fenómenos, las cuales no pueden establecerse más que por la medida de magnitudes.

7. Medida de magnitudes. Unidades. — Medir una magnitud es

compararla con otra de la misma especie tomada como unidad.

Para medir, v. gr. : la longitud de una recta, se escoge, primero, otra longitud, que se llama *unidad*, y se ve cuántas veces aquélla contiene a ésta. Si, por ejemplo, sobre la longitud de AB (fig. 2), se puede colocar cinco veces de extremo a extremo, la longitud de la unidad PQ, diremos que el número 5 es la medida de la longitud AB. En caso de que AB no contenga un número exacto de veces la unidad, se emplean los submúltiplos de ésta, por 10, 100, 1000 : así, la longitud AB' estará medida por 5,25, si contiene cinco veces a la unidad, más 25 centésimas partes de esta unidad.

La elección de unidad es, en principio, indiferente. Por otra parte, es evidente que el número que mide AB depende de esta elección. En efecto, si, en vez de PQ, se hubiera tomado P'Q', dos veces menor, ésta hubiera sido contenida diez veces en AB, y esta recta hubiese quedado medida por un número dos veces mayor.

Se comprende, pues, para las necesidades de la ciencia y la comodidad del comercio, la utilidad de los convenios que fijan las unidades de las diversas magnitudes.

8. Metro y centímetro. — En el Sistema Métrico, se ha adoptado, como unidad de longitud, el *metro* (1/40 000 000 aproximadamente, de la longitud de un meridiano terrestre). Esta longitud se halla representada por un tipo, el *metro normal*, que es una regla de platino, depositada en los Archivos de París, que mide un metro entre sus dos

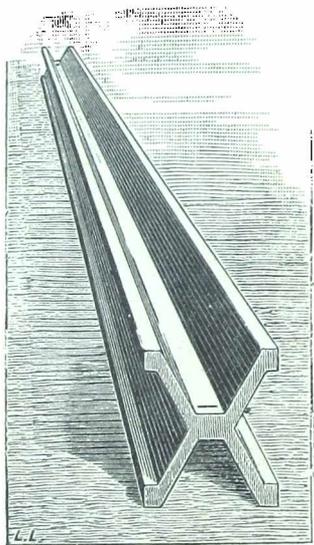


Fig. 3.

extremos. Para medidas de precisión, se ha construido una copia de este metro, consistente en una regla de *platino iridiado*, a la cual se ha dado forma de un sólido con cuatro ranuras (fig. 3). Esta forma, según los trabajos de Tresca, ofrece el máximo de resistencia a la flexión

Cerca de sus extremos, lleva dos marcas que comprenden entre sí la longitud de un metro, cuando la regla se halla sumergida en hielo derretido. Este aparato se denomina *Metro internacional*, del cual se han reproducido varias copias para los diversos países adheridos a la *Convención del Metro*.

Para las medidas empleadas en las ciencias físicas, el Congreso internacional de Electricistas de 1881 decidió que se tome como unidad de longitud el *centímetro*, centésima parte del Metro internacional.

Observaciones acerca de la definición del metro. — Por distintas razones, ha habido que abandonar la primitiva definición geométrica del metro. En primer lugar, no todos los meridianos tienen igual longitud. Pero, aunque, para definir el metro, se hubiera escogido un meridiano particular, no se tendría la certidumbre de que esta longitud permaneciera invariable. Al contrario, como la tierra se enfría constantemente, sus dimensiones tienen que disminuir. Por estas razones, se ha elegido un patrón para definir el metro.

Más tampoco puede darse por segura la invariabilidad de la longitud de este patrón, y por ello, se le ha comparado, tal como hoy existe, a una longitud absolutamente invariable, la longitud de onda de una radiación bien definida (612), por ejemplo, la raya roja de cadmio. Tal comparación la han efectuado, mediante un método interferencial (671) sumamente exacto (debido a Michelson), Benoit y éste, en la Oficina internacional de pesas y medidas de Sèvres. Haciendo los mismos experimentos en un lugar o en una época cualquiera, se sabrá, pues, reproducir el metro tal como era cuando Benoit y Michelson hicieron los experimentos.

9. Unidades fundamentales y unidades derivadas. — Medida de superficies y volúmenes. — Entre las unidades empleadas para medir las diversas magnitudes, unas se han elegido arbitrariamente, y son las *unidades fundamentales*, y otras, según la elección de las primeras, y son las *unidades derivadas*.

Así, ofrece ventajas el tomar como *unidad de superficie* la superficie de un cuadrado cuyo lado es la *unidad de longitud*: el *centímetro cuadrado*. Gracias a este convenio, el número S que mide el área de un rectángulo, se obtiene directamente multiplicando los números a y b que representan las medidas de sus lados; lo cual no podría realizarse, de haber adoptado una unidad *calquiera* de superficie sin relación con la unidad de longitud. En este caso, el valor numérico S del área del rectángulo hubiera sido únicamente proporcional al producto de los números a y b . Luego se hubiera tenido $S = Kab$.

Pero, dada la elección hecha de la unidad de superficie, el coeficiente K resulta igual a la unidad.

Por idénticas razones, se ha elegido como unidad de volumen el volumen de un cubo cuya arista sea la unidad de longitud, es decir, el *centímetro cúbico*. Por tanto, el número V que mide el volumen de un paralelepípedo rectangular es igual al producto de los números a , b , c , que representan las medidas de sus aristas: $V = abc$.

Estas unidades de superficie y de volumen se denominan *unidades derivadas*, mientras que la unidad de longitud es una *unidad fundamental*.

10. Sistemas de medidas racionales. — Sistema C. G. S. — Del mismo modo, se pueden relacionar entre sí las unidades que sirven para medir

las distintas magnitudes. De tal manera, se constituye un *Sistema de medidas racionales*, que posee el menor número posible de unidades fundamentales escogidas arbitrariamente. Tal era el *Sistema métrico*, y lo es también el *Sistema C. G. S.*, actualmente empleado en Física. Se designa así por sus unidades fundamentales, a saber: una unidad de longitud, el *Centímetro*; una unidad de masa, el *Gramo*, y otra de tiempo, el *Segundo*.

11. **Errores en las medidas.** — **Error absoluto, error relativo.** — **Exactitud de una medida.** — No puede efectuarse ninguna medida, sin cometer cierto error, llamado *error absoluto*, que, por otra parte, es tanto menor, cuanto más perfecto sea el aparato empleado.

Se da el nombre de *error relativo*, a la relación entre el error absoluto y la magnitud medida. Por ejemplo, si al medir una longitud de 1 metro, se comete un error absoluto de 1 mm., el error relativo será de $1/1000$. Dícese, entonces, que la *exactitud* o *precisión* de esta medida es de $1/1000$.

Luego la exactitud de una medida depende no sólo del error absoluto, sino también de la magnitud medida. Es decir que, si, por ejemplo, en una longitud de 1 kilómetro, se equivoca uno en 1 metro; o en 1 milímetro, para una longitud de 1 metro, o en $1/100$ de milímetro, si la longitud es de 1 centímetro, las tres medidas se han verificado con *igual exactitud*.

MEDIDA DE LONGITUDES

12. **Reglas graduadas.** — Las *reglas graduadas*, que sirven en las medidas ordinarias, son generalmente láminas planas de latón, divididas en *milímetros*. La distancia de las dos líneas extremas es exactamente de 1 metro, a la temperatura de 0° ; se la comprueba por comparación con el *metro tipo*, mediante el instrumento de precisión llamado *comparador* (21). Las rayas intermedias distan 1 milímetro una de otra; se las marca con el aparato de precisión llamado *máquina de dividir* (18).

Cuando se mide una longitud por medio de una regla graduada, se encuentra generalmente cierto número de divisiones, esto es, de milímetros, *más* un resto. No es posible pensar en calcular este resto mediante una nueva subdivisión de la regla; pues el $1/2$ milímetro se lee ya con gran dificultad; es preciso saber valorar esta fracción a simple vista, o bien recurrir a un instrumento de precisión.

13. **Nonio o vernier.** — El vernier es un instrumento de precisión que permite calcular longitudes más pequeñas que las últimas divisiones de una regla o de un círculo marcador, no obstante que presenta por sí divisiones casi iguales a las de éstos y fáciles de leer igualmente.

1º *Vernier rectilíneo.* — Compónese de una pequeña regla graduada *ab* que puede deslizarse a lo largo de la regla grande AB, de modo que

las dos graduaciones se toquen (fig. 4). Generalmente, se le da una longitud igual a 9 divisiones de la regla grande, o sean 9 milímetros, y después se la divide en 10 partes iguales. De aquí resulta que cada división del vernier *ab* es inferior a las de la regla *AB* en una décima de milímetro. Así se obtiene un vernier de un décimo, que es el más

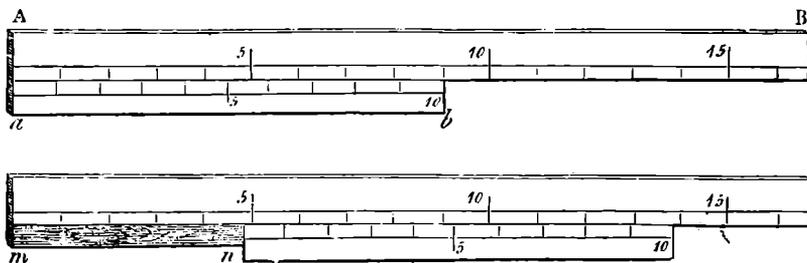


Fig. 4 y 5.

usado; puede servir para calcular longitudes con aproximación de menos de una décima de milímetro.

Operación. — Se aplica el objeto *mn* contra la regla (fig. 5): así se ve que hay 4 milímetros más una fracción. Se corre el vernier hasta que toque el extremo *n* del objeto; la coincidencia se verifica entre los grados de las escalas en la octava división del vernier. Esto indica que la fracción que hay que medir es igual a 8 décimas de milímetro.

En efecto, como las divisiones del vernier son una décima parte más pequeñas que las de la regla, se ve que a partir del punto de coincidencia, contando de derecha a izquierda, distan de las de la regla 1, 2, 3 décimas de mm. Del extremo *n* del vernier a la 4ª división de la regla, hay, pues, 8 décimas de mm.: luego *mn* igual 4 mm. 8.

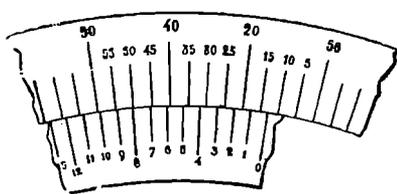


Fig. 6.

2º *Verniers al vigésimo, al quincuagésimo, etc.* — Para obtener una longitud a un vigésimo o a un quincuagésimo de mm., poco más o menos, bastaría dar al vernier una longitud de 19 o 49 mm., y dividirlos en 20 o en 50 partes iguales.

3º *Vernier circular.* — El vernier puede servir también para medir arcos de círculo. En este caso se compone de un arco pequeño de círculo graduado, aplicado a la extremidad de una alidada (fig. 6) y móvil contra el círculo grande graduado. Un vernier al trigésimo, sobre una división en medios grados, sirve para apreciar el minuto: así, el cero del vernier de la figura 6 indica 22º 21'.

14. **Cartabón de corredera.** — Este instrumento se compone de una

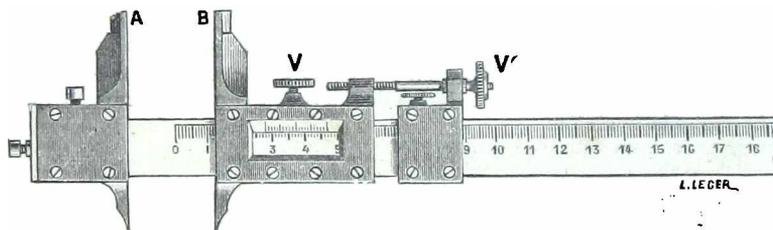


Fig. 7.

regla de hierro (fig. 7) graduada en milímetros, en cuya extremidad está fijo un tope A. A lo largo de la regla se desliza un *cursor* B que

se puede fijar por medio de un *tornillo de presión V* y moverse poco a poco por medio de otro *tornillo de ajuste V'*. El cursor tiene un vernier al 1/10 que se mueve sobre la división de la regla. El objeto, cuyo grueso se desea medir, se coloca entre A y B. La división y su vernier dan su grueso a 1/10 de milímetro.

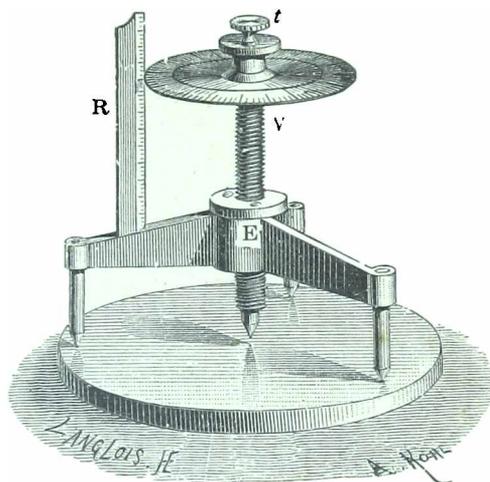


Fig. 8.

15. Tornillo micrométrico. — Se construye un *tornillo micrométrico*, tallando en un cilindro de acero un resalte en hélice, cuyo perfil es generalmente triangular.

El tornillo V (fig. 8) tiene una *tuerca E*, que presenta en hueco el relieve del filete. Se mete el tornillo en la tuerca. Si ésta está fija cuando se da un movimiento de rotación a la *cabeza de tornillo t*, el tornillo *avanza* en su tuerca. Al contrario, si el tornillo está sujeto de manera que pueda dar vueltas sin avanzar, y si la tuerca es guiada por una corredera, ésta es la que se mueve al dar vueltas a la cabeza del tornillo (fig. 12). En ambos casos, *el movimiento*

longitudinal de la parte móvil es proporcional al ángulo de rotación del tornillo.

El movimiento que corresponde a una vuelta completa se llama *paso de rosca*. En el micrométrico el paso es igual a medio milímetro o a 1 milímetro.

16. Esferómetro. — Este instrumento sirve para *medir* pequeños gruesos, para la *verificación de la curvatura de las superficies esféricas* y la *medida de su radio*.

Descripción. — El tornillo micrométrico V (de rosca de 1/2 mm.) puede girar en una tuerca E (fig. 8) fija en el centro de un trípode, el cual descansa sobre un plano de vidrio mediante tres puntas que forman los vértices de un triángulo equilátero. El tornillo termina en una punta roma. En la cabeza tiene un disco delgado con 500 divisiones, que se mueve ante una regla R de borde fino, fija en el trípode y dividida en medios milímetros.

Medida de un grueso. — Supongamos que se trata de medir, por ejemplo, el grueso de un espejo de caras paralelas. Llévase la punta del tornillo al plano del disco de vidrio y se toma nota de la división del limbo y de la del cuchillo, que están una frente a otra; sea n_0 la primera y h_0 la segunda.

Después, se levanta el tornillo una altura suficiente para intercalar el espejo entre el plano y la punta, y luego, se baja ésta otra vez hasta hacerla coincidir exactamente con la cara superior del espejo; sean n_1 y h , las dos divisiones que se encuentran frente a frente en la segunda posición.

Tendremos, pues, llamando e al grueso :

$$e = \left(\frac{h_1 - h_0}{2} + \frac{n_1 - n_0}{1000} \right) \text{ mm.}$$

Verificación y medida de un radio de curvatura. — Supongamos que se trate de averiguar la esfericidad de una superficie convexa, por ejemplo, de un vidrio para anteojos y medir su radio de curvatura.

Colócanse las tres puntas, A, B, C del instrumento sobre la superficie, y se lleva la

punta central O en coincidencia (fig. 9). Los cuatro puntos O, A, B, C determinan una superficie esférica. Moviendo el instrumento sobre el vidrio, la coincidencia no cesará si éste es esférico; pero si, en el caso de que la superficie no tenga el mismo radio de curvatura en todos sus puntos.

Supongamos que sea perfectamente esférica y tratemos de medir su radio R. En una cualquiera de las posiciones del aparato, el plano de las tres puntas inferiores corta a la esfera según un círculo mínimo, AMBC. Este círculo es precisamente igual al circunscrito en el triángulo equilátero que tiene sus tres puntas

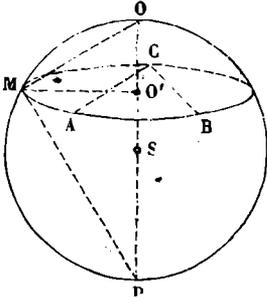


Fig. 9.

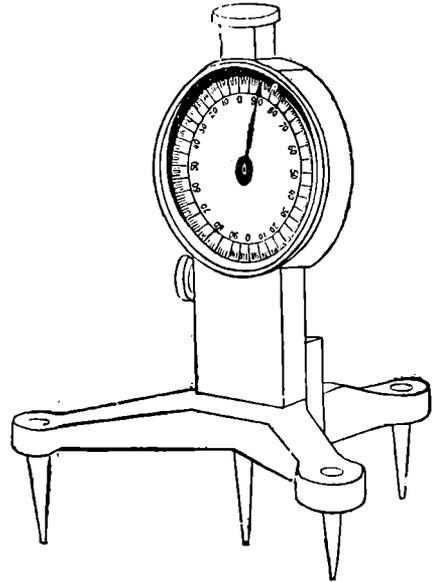


Fig. 10.

como vértices. Bastará construir el triángulo ABC, cuyos tres lados se conocen, y después el círculo circunscrito, para tener el radio r .

Luego, se mide la distancia $OO' = e$ de la punta roma al centro del círculo.

Se tiene, en el triángulo rectángulo O, M, P,

$$MO^2 = OO' \times O'P, \quad \text{o} \quad r^2 = e(2R - e);$$

de donde

$$2R = e + \frac{r^2}{e}.$$

Esferómetro de E. Rothé. — En este modelo (fig. 10), destinado para medidas rápidas y de mediana precisión, la punta central, en vez de ser movida por un tornillo, se prolonga por una cremallera, que engrana con un piñón que tiene una aguja móvil sobre un cuadrante. La aguja está en el cero de la graduación cuando la punta central está en el plano del tripode; en cualquier otro caso, ella indica, en centésimos de milímetro, la distancia de la punta a este plano.

17. Compás de tornillo de Palmer. — Este compás (fig. 11) se compone de un tornillo micrométrico de paso de 1 milímetro y de una tuerca fija. Dando vuelta al tornillo se le separa de un tope B' que forma parte de la tuerca. Para medir lo que se ha movido el tornillo, la cabeza de éste lleva un mango que se desliza sobre un cilindro interior, que tiene en el recorrido de una generatriz una división en milímetros: el mango está graduado en la circunferencia de su borde inferior en 20 divisiones, generalmente,

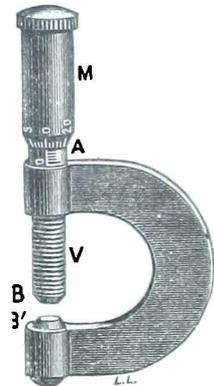


Fig. 11.

Supongamos que estando el tornillo en contacto con su tope, el cero de la división del mango esté enfrente de la generatriz. Se interpone el cuerpo cuyo grueso e se desea medir. Si n es el número de milímetros marcados en la generatriz y N la división del tambor situada en frente de la marca,

$n + \frac{N}{20}$ es, en milímetros, el grueso del cuerpo.

18. **Máquina de dividir.** — Es un instrumento de precisión que tiene diversas aplicaciones. Vamos a describir un modelo bastante antiguo, cuya sencillez facilita el que se comprenda mejor el principio. Esta máquina se compone esencialmente de un tornillo micrométrico fijo V (fig. 12) que tiene una tuerca movable. El cilindro del tornillo está cogido en sus dos extremidades por dos collares en que puede girar sin cambiar de sitio, con frotamiento suave. La rotación se efectúa por medio de un manubrio M, que está enlazado con la cabeza del tornillo; los ángulos de rotación se miden por medio de un disco de limbo graduado R, sostenido por su centro cerca de la cabeza del tornillo, como el del esferómetro y que

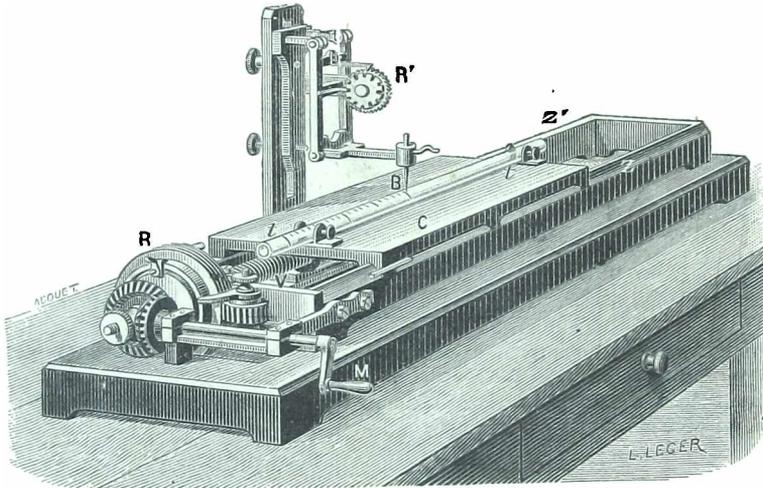


Fig. 12.

da vueltas con él delante de un índice fijo. La tuerca abarca el tornillo y no puede girar con él, sino que tiene que avanzar o que retroceder según el sentido de la rotación. Como el paso es de un milímetro y el círculo está dividido en 100 partes, se mueve la tuerca $\frac{1}{100}$ de milímetro por cada división. A la tuerca está unida una carretilla de acero C, que anda con ella resbalando por el marco zz'. En B, se ve el buril, es decir, el instrumento de punta de acero o de diamante que sirve para hacer las marcas sobre los metales o en el vidrio.

1º *Supongamos que se trate de marcar n divisiones iguales sobre un tubo de vidrio.* — Colócase el tubo *tt* paralelamente al tornillo V. En una operación preliminar, se cuentan los números de vueltas y de centésimas de vuelta necesarias para hacer andar la punta del buril entre los puntos extremos: sean *p* y *q* estos números. Es evidente que, para obtener *n* divisiones iguales, será preciso practicar una marca cada vez que se hayan ejecutado $\frac{1}{n} \left(p + \frac{q}{100} \right)$ vueltas a partir del punto O.

2º *Supongamos que se quieran marcar divisiones de longitud dada.* — Se fija la longitud que se trata de graduar, tubo de vidrio o regla metálica, lo mismo que anteriormente. Sea *l* la longitud, en milímetros, del grado de la escala que se desea marcar. El número de vueltas y de centésimas de vuelta correspondiente a esta longitud, está dado por la ecuación:

$$p + \frac{q}{100} = l.$$

3º Supongamos que se quiere medir la distancia entre dos rayas. — Se pone el buril en contacto con la primera raya y, luego, dando vuelta al tornillo, en contacto con la segunda. Si se han dado p vueltas más q divisiones del tambor, la distancia que se busca es evidentemente :

$$\left(p + \frac{q}{100}\right) \text{mm.}$$

19. Micrómetro ocular. — Llámase así un microscopio provisto de un ocular micrométrico, que sirve para medir una pequeña longitud (fig. 13).

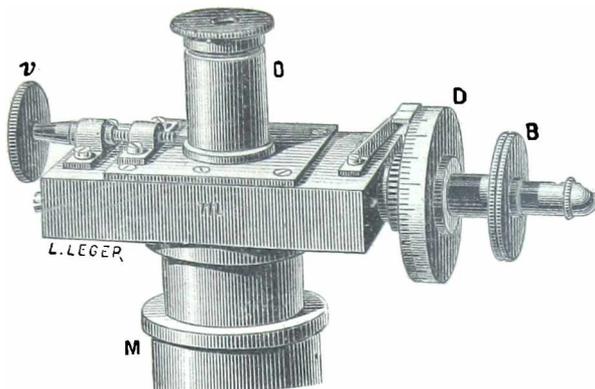


Fig. 13.

Para medir la longitud comprendida entre dos marcas paralelas cercanas t, t' (fig. 15) se dispone, por encima de las marcas y frente a ellas, un micros-



Fig. 14.

copio M , de manera que las imágenes T, T' de la marcas t, t' , suministradas por el objetivo O , se formen en el plano del retículo R (fig. 14).

El ocular de Ramsden O' (582), que sirve para la observación, permite además distinguir la imagen P (fig. 14) de una especie de peine situado muy cerca del plano del retículo.

Hállase sostenido el retículo f por medio de un marco que recibe un movimiento de traslación de un tornillo micrométrico. Este tornillo es puesto en movimiento con el botón B (fig. 13); un tambor graduado D , solidario de B , permite valorar, gracias al punto de mira, r , las fracciones de vuelta del tornillo. Un giro completo de éste hace moverse el retículo una longitud igual a la distancia entre dos dientes consecutivos del peine.

De modo que, contando el número de vueltas n que corresponde a la medida previa de una longitud conocida l colocada en tt' , se obtendrá la longitud tt' .

Ahora bien, si para medir una longitud L desconocida, es N el número de vueltas, resultará $L = N \frac{l}{n}$.

El valor $\frac{l}{n}$ se llama la *tara del micrómetro*.

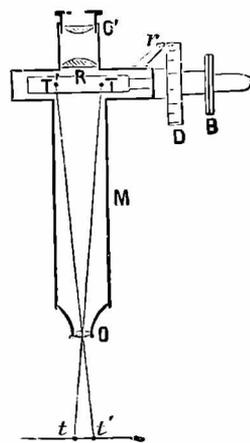


Fig. 15.

20. Catetómetro. — Es un aparato destinado a medir la distancia vertical entre dos puntos. Consta, principalmente, de una escala graduada (fig. 16), a lo largo de la cual puede deslizarse un anteojo horizontal L , con el que se mira sucesivamente a los dos puntos : la distancia vertical entre éstos queda determinada por el espacio que el anteojo recorre en el soporte.

Descripción. — Este aparato se compone de un tubo hueco de latón AB , sostenido por una columna de acero que descansa en un trípode

de tornillos de nivel, el cual tubo penetra, como un mango, en aquélla y gira libremente a su alrededor. A lo largo del tubo, se deslizan dos correderas unidas entre sí por un tornillo de aproximación V. La corredera superior lleva el anteojo L y un nivel de aire N, montados sobre

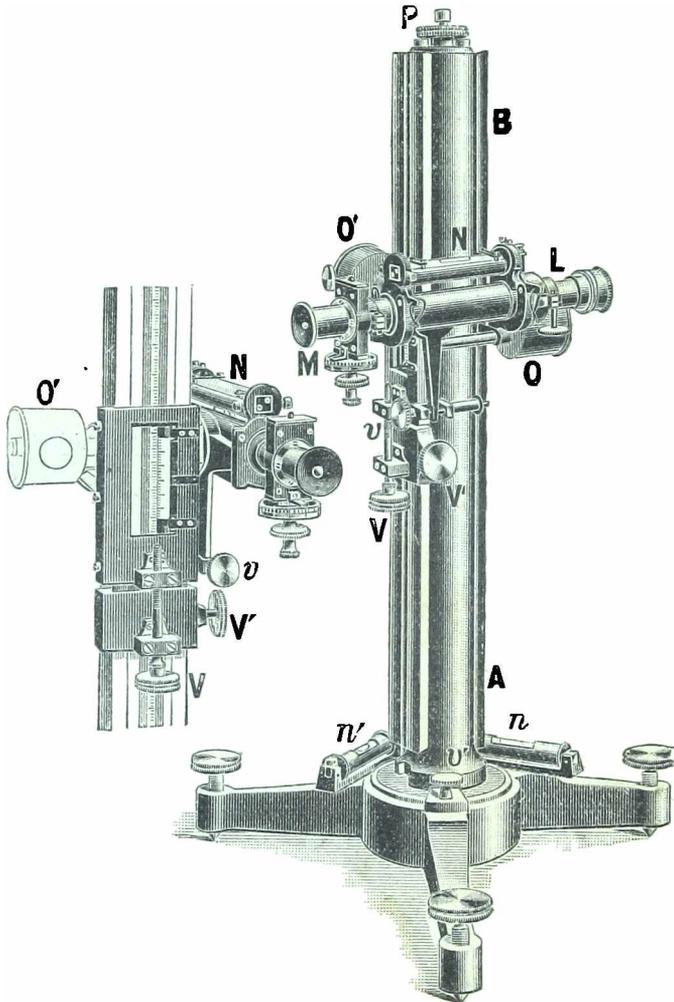


Fig. 16.

una horquilla que se inclina más o menos por medio de un tornillo de aproximación v para conseguir la horizontalidad del nivel y del anteojo.

En toda la longitud del tubo AB, existe una escala en milímetros: un nonio adherido a la corredera que contiene el anteojo, se mueve a lo largo de la escala. Además, el anteojo se halla provisto de un micrómetro ocular que permite medir exactamente las menores distancias verticales.

Operación. — Para medir la distancia que separa a dos puntos, se bajan o suben las dos correderas hasta que el anteojo quede a la altura de uno de aquéllos: luego, se fija la corredera inferior por medio de un tornillo de presión V' , y se da lentamente vueltas al botón V, mirando al punto en cuestión con el anteojo. Vese la indicación del nonio

on la regla y, después, se procede del mismo modo respecto al segundo punto dado. La diferencia entre los dos números obtenidos es igual a la distancia vertical de los dos puntos.

Regulación. -- Las indicaciones del catetómetro sólo son exactas si el aparato está bien regulado. La regulación es una operación muy delicada, que consiste en colocar el eje del aparato en posición vertical y el eje óptico del anteojo, en posición perpendicular al eje de rotación.

21. Comparador. -- Obtiénese un comparador disponiendo dos microscopios de ocular micrométrico de manera que sus ejes sean paralelos. Después de observar los extremos de la longitud que se quiere valorar, sustitúyese ésta por una regla graduada y se colocan los retículos de los micrómetros de modo que coincidan con la imagen de las divisiones, interiores o exteriores, más próximas a la longitud que se trata de medir.

En el primer caso, hay que añadir a las divisiones n_1 y n_2 así consideradas, los movimientos v_1 y v_2 del micrómetro.

En el segundo caso, hay que restarlas.

Se conoce el número de vueltas de cada tornillo que corresponde al movimiento igual a una división de la regla, de donde se deducen las taras de los microscopios.

Comparador vertical. -- Es una especie de catetómetro con dos anteojos (fig. 17). Se compone de una columna móvil de acero alrededor de un eje vertical y sostenida en fuerte armadura de fundición que descansa en un trípode de tornillos de nivel. Sobre dicha columna, se mueven dos correderas que conducen los anteojos LL de ocular micrométrico, al mismo tiempo que dos niveles para la regulación. Es menester que el eje de rotación sea vertical y que los ejes ópticos de los anteojos le sean perpendiculares.

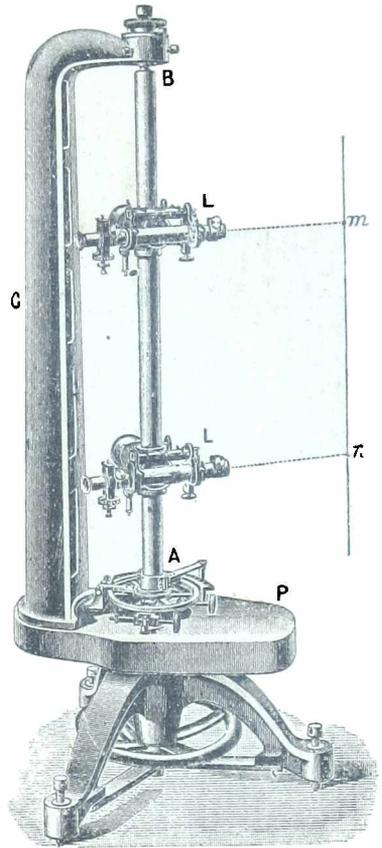


Fig. 17.

La regla va adherida también a un trípode de tornillos de nivel, independiente del anterior. Colócasela a la misma distancia de los anteojos que los puntos m , n , cuya diferencia de nivel se mide. Después de mirar a estos dos puntos, se vuelve la columna de modo que se vean las divisiones de la regla.

Comparador horizontal de la Oficina internacional de pesas y medidas. -- Este aparato sirve para medir la pequeña diferencia que pueda existir entre el metro y la distancia de dos marcas trazadas en una regla. Los anteojos son dos microscopios fijos MM' . Se hallan sujetos en pilares de mampostería PP' (fig. 18), por medio de fuertes escuadras.

Las reglas que se desea comparar se colocan en dos artesas paralelas A A' que mueve un vagón movable sobre un fuerte apoyo de hierro fundido *rx*.

Los bancos de las artesas interiores que soportan las reglas se hallan provistos de diversos tornillos reguladores que permiten graduar las marcas de las reglas.

En una de las artesas se encuentra el metro tipo, y en la otra, la regla que se compara con él; se hace coincidir los retículos con las marcas límites de la regla. Por el funcionamiento del manubrio *m* se reemplaza la primera corredera por la segunda, y por el movimiento

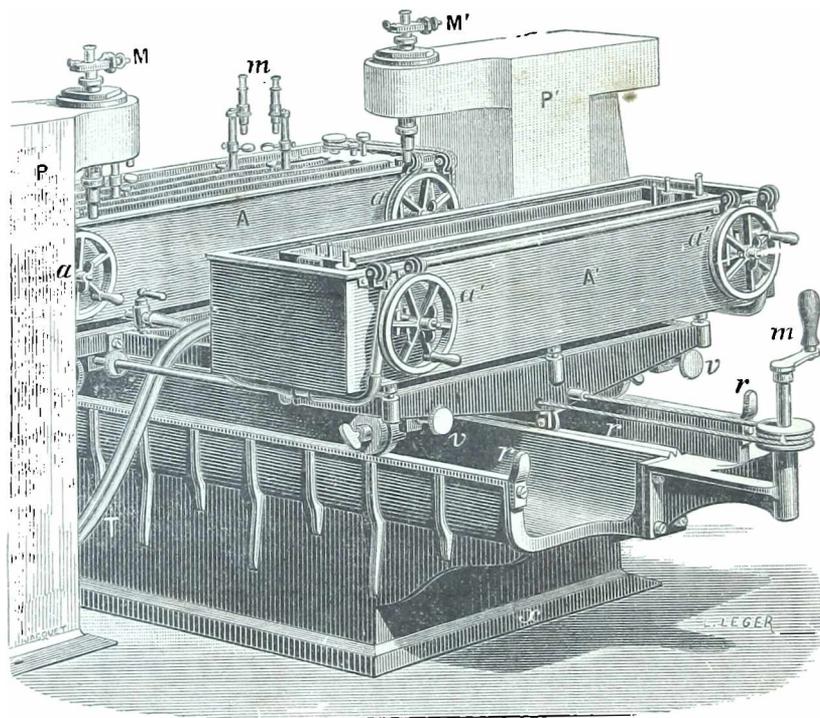


Fig. 18.

de los tornillos micrométricos *v*, se termina esta sustitución. Luego, hay que hacer entrar en juego los tornillos micrométricos de los microscopios, para volver a establecer la coincidencia con las imágenes de las marcas. Estos movimientos micrométricos, unidos a la tara, dan a conocer por su valor y su sentido, la diferencia de las longitudes de ambas reglas.

Las artesas están cerradas por tapaderas con aberturas adecuadas y contienen agua, cuya temperatura se expresa por termómetros convenientemente alumbrados, recostados en horquillas a derecha e izquierda de las barras. Estas indicaciones se ven con pequeños microscopios.

En *a* y *a'* se hallan los manubrios que mueven a los agitadores.

El comparador permite medir las dilataciones lineales (244).

22. Medidas geodésicas. — En Geodesia, se deben medir con gran

elasticidad puede hacer equilibrio a fuerzas variables. He aquí algunos modelos de dinamómetros.

Pesón. — Uno de los dinamómetros usuales más sencillos es el *pesón*, que consiste en una lámina de acero templado AB (fig. 20), encorvada a manera de V. En la extremidad de la rama B está fijo un arco de hierro *n*, que se prolonga y pasa libremente por una abertura practicada en la extremidad de la rama A. En ésta se encuentra fijo un arco parecido *m*, que penetra a su vez análogamente en el brazo B. Los arcos *m* y *n* terminan, aquél, en un garfio, el segundo, en un anillo; y en el arco *n* hay una escala graduada.

Para graduar el aparato se cuelgan del garfio sucesivamente pesas de 1 kg., 2 kg., 3 kg... se marcan con rayas en el arco *n* los puntos donde se detiene el brazo A, y se ponen a estas rayas los números 1, 2, 3...

Si se quiere medir, por ejemplo, el esfuerzo necesario

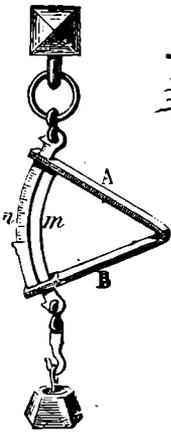


Fig. 20.

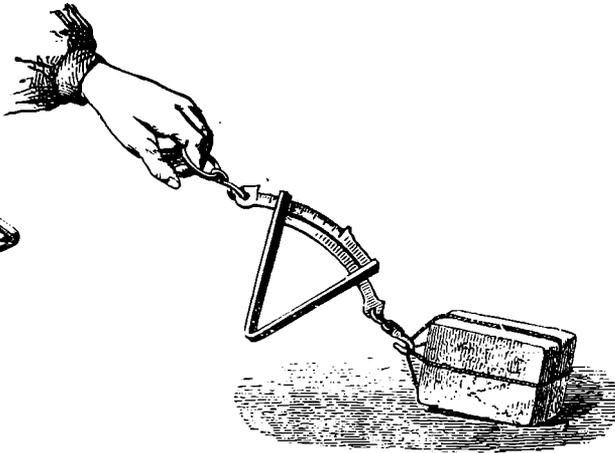


Fig. 21.



Fig. 22.

para arrastrar un fardo (fig. 21), se engancha el garfio del arco *m* al fardo, y después, tomando con la mano el anillo del arco *n*, se tira hasta que se produzca el movimiento. La flexión del brazo A marca entonces, en el arco *n*, en kilogramos-peso, el valor de la fuerza de tracción.

Pesón de hélice. — El resorte es un alambre de acero enrollado en hélice (fig. 22); se halla contenido en una caja cilíndrica de latón, a la que está sujeto en *d*, mientras que su extremo inferior descansa en un platillo de metal A que se halla unido a una varilla vertical B; ésta puede salir de la caja tanto más, cuanto mayor sea el esfuerzo aplicado al gancho de ésta.

La varilla AB se gradúa en kilogramos-peso; esta graduación se hace como la del aparato precedente.

Dinamómetro de Poncelet. — Se compone de dos muelles metálicos LL (fig. 23) articulados en sus extremos por dos hojas cortas y rígidas. Hallándose en reposo el aparato, las dos ramas de que consta son rectilíneas y paralelas. Se fija el centro de una de ellas y se aplica, en medio de la otra rama y perpendicular a su dirección, la fuerza que se

trata de medir. Tratándose de fuerzas no muy grandes, la separación de ambas ramas es proporcional a la fuerza que actúa. Estas separaciones pueden medirse ya con una regla graduada, sujeta a una de las hojas, ya por medio de una aguja que gira alrede

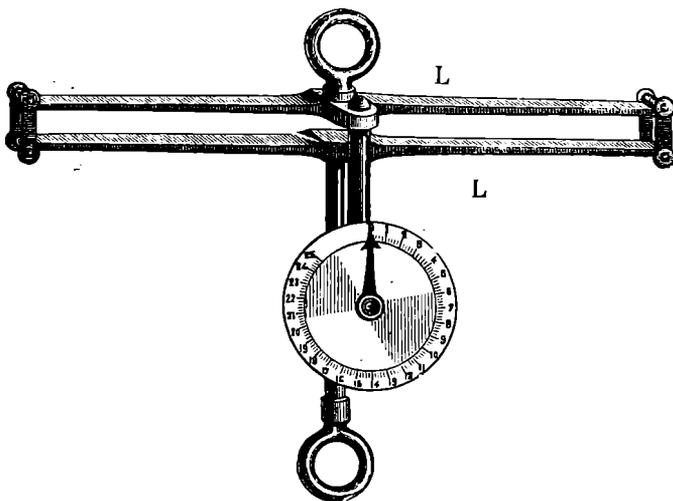


Fig. 23.

dor de un cuadrante. Esta aguja está fija en el eje de un piñón dentado, movido por una cremallera accionada por una de las hojas.

27. Representación de las fuerzas. — Vectores. — Podemos representar gráficamente, por un solo símbolo, los tres elementos característicos de una fuerza. Trázase, por su punto de aplicación, en el sentido de su dirección, una línea recta indefinida AX (fig. 24); después se



Fig. 24.

lleva una unidad arbitraria de longitud (por ejemplo el centímetro) a esta línea, partiendo del punto de aplicación y en el sentido

de acción de la fuerza, tantas veces como la fuerza dada contiene a la unidad que sirve para medirla. De este modo, tenemos un *segmento dirigido* AP que representa completamente la fuerza : es el *vector*.

El empleo de los vectores permite que se apliquen los métodos geométricos al estudio de las fuerzas y de las velocidades.

28. Deformación de los cuerpos sólidos. — Elasticidad. — Se da el nombre de elasticidad a la propiedad que tiene un cuerpo, deformado por la acción de una fuerza, de volver a su forma primitiva cuando la fuerza deja de influir

Si esta fuerza tiene suficiente intensidad, la deformación puede subsistir parcialmente, y entonces, se dice que se ha pasado el límite de elasticidad. Finalmente, si aumenta aún la intensidad de la fuerza, el cuerpo sólido puede romperse.

Las fuerzas pueden obrar de diversas maneras sobre los cuerpos sólidos y producir distintas clases de elasticidad.

1ª *Elasticidad de tracción.* — Cuando una barra sólida, de longitud L y de sección S, es estirada en sentido de su longitud por una fuerza F, sufre un alargamiento l.

Coficiente de elasticidad. — Los experimentos demuestran que esto alargamiento es proporcional a F y a la longitud L, y en razón inversa de la sección. Luego, podemos indicar :

$$[1] \quad l = \frac{FL}{ES}, \quad \text{de donde} \quad E = \frac{FL}{Sl} \quad [2]$$

Se denomina *coeficiente de elasticidad* de la sustancia.

Wertheim ha determinado estos coeficientes de elasticidad, en kilogramos, para alambres de un milímetro cuadrado de sección, a la temperatura de 15 grados centígrados. Varian desde 1 803 para el plomo, hasta 20 794, para el hierro recocido.

OBSERVACIÓN. — La reacción elástica que nace de un alargamiento l , que es igual a la fuerza F , puesto que ésta la equilibra, es, según la fórmula [1], proporcional a l .

Coeficiente de rotura. — Tenacidad. — Cuando la fuerza de tracción se hace demasiado intensa, la barra se rompe. Esto se produce por la acción de una fuerza proporcional a la sección y variable según la sustancia. Se denomina *coeficiente de rotura* la fuerza que determina el rompimiento de una barra de 1 mm² de sección.

He aquí algunos coeficientes de rotura :

Plomo	1 kg. por mm ²	Cobre	24 kg. por mm ²
Oro	11 —	Hierro	30 —
Aluminio	14 —	Níquel	48 —
Plata	17 —	Acero ordinario de 30 a 80 kg.	

2ª *Compresibilidad.* — Cuando se ejercen fuerzas de presión, sobre toda la superficie de un sólido *, su volumen disminuye, aunque sumamente poco. Se determina un coeficiente de compresibilidad lo mismo para sólidos que para líquidos, como veremos más adelante (225).

Trituración. — Opuesta a la rotura por tracción es la rotura por *compresión* que se llama *trituration*. Este fenómeno es muy importante, especialmente en los materiales de construcción. Los coeficientes de *trituration* expresados en kilogramos por milímetro cuadrado, varían entre 2,50, para la piedra de construcción, hasta 79 para el acero.

3ª *Elasticidad de flexión. — Resistencia a la flexión.* — Cuando se aprieta, por un extremo, una barra sólida, y, por el otro, se ejerce una fuerza normal a su dirección, la barra se dobla. Esta flexión es proporcional a la fuerza que la produce, si ésta es pequeña. La reacción elástica es también proporcional a la flexión. Cuando cesa la fuerza, la barra vuelve a su posición de equilibrio; pero, si la fuerza ha sido demasiado grande, la barra, después de la acción de ésta, conserva una flexión residuo: y hasta puede quebrarse, bajo la acción de una fuerza excesivamente grande.

Si suponemos una barra rectangular de anchura a , de espesor e y de longitud L , la fuerza que produce la rotura se representa por la fórmula :

$$F = \frac{Kae^3}{L}$$

siendo K un coeficiente característico de la sustancia de la barra.

Cuando se aprieta la barra por sus dos extremos y que la fuerza actúa en el centro debe ésta tener, para provocar la rotura, una intensidad cuatro veces mayor que en el caso anterior. Si la barra está encajada, la fuerza que produce la rotura es ocho veces más grande.

Si una barra está ajustada en uno de sus extremos, la resistencia mínima se hallará en dicho extremo. Si se quiere que la resistencia de la barra sea igual en cada sección, es necesario darle un perfil parabólico.

OBSERVACIÓN. — *Caso de los tubos.* — La resistencia que ofrece un tubo a la flexión es superior a la que tendría un cilindro macizo, construido con la misma cantidad de materia.

Esta propiedad ha recibido numerosas e importantes aplicaciones, porque permite combinar la solidez con la ligereza. Basándose en ella, se fabrican los cuadros de velocípedos con tubos de acero.

4ª *Elasticidad de torsión.* — Cuando se fijan, por uno de sus extremos, una varilla o un alambre y se tuercen, por el otro, mediante un par (32), ceden a la torsión hasta que sus reaccibnes elásticas formen un par que se equilibre con el aplicado. Si el esfuerzo es muy débil, la torsión cesa al mismo tiempo que él; pero si es excesivo, queda una torsión residuo, y hasta puede haber rotura si el par es suficientemente grande.

29. Presión. — Cuando una fuerza prensa normalmente una superficie plana, el efecto de presión que produce depende de la magnitud de la parte de superficie prensada.

* Se realiza cómodamente esta condición sumergiendo el sólido en un líquido sobre el cual se ejerce presión por medio de un pistón.

Si suponemos, por ejemplo, que dos cilindros de igual peso, pero de bases diferentes, presen un plano horizontal, sus acciones no serán idénticas. Y si el plano, en vez de ser rígido, fuese algo blando, el cilindro que más se introduzca en él será, evidentemente, el de menor base: éste es el que mayor *presión* ejerce sobre la superficie.

Se llama *presión producida por una fuerza normal*, al cociente $p = \frac{F}{S}$ que resulta de dividir la intensidad de la fuerza por la magnitud de la superficie.

Si, por ejemplo, una fuerza de 10 kg. actúa sobre una superficie de 2 cm², la presión sobre dicha superficie es de 5 kg. por cm²; si se ejerce la misma fuerza sobre 1 mm², la presión es de 1 000 gr.

Con muchos aparatos usuales, se producen presiones considerables, reduciendo mucho la superficie en que se ejerce el esfuerzo. Este es el principio del empleo de cuchillos, tijeras, tenazas, pinzas cortantes, etc., que permiten cortar cuerpos más o menos duros, mediante muy ligeros esfuerzos.

Recíprocamente, cuando se quiere edificar en un terreno algo blando, se construye sobre una ancha base de mortero que, repartiendo los pesos por una gran superficie, no produce, en cada punto, más que una presión débil, a pesar de la magnitud del peso que el suelo soporta.

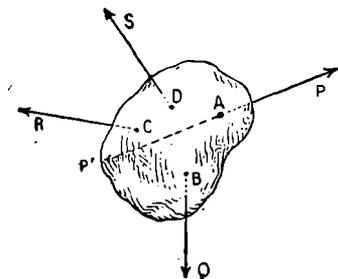


Fig. 25.

Unidad C. G. S de presión. — En el sistema C. G. S., se mide la presión en *dinas* (78) por centímetros cuadrados.

30. Resultante y componentes. — Se llama *resultante* de varias fuerzas aplicadas a un mismo cuerpo la fuerza que produce el mismo resultado que aquéllas juntas.

Se llaman *componentes* de una fuerza el conjunto de fuerzas que tienen la primera por resultante.

Por ejemplo, cuando varias fuerzas P, Q, R, S, aplicadas a un mismo cuerpo (fig. 25), se equilibran entre sí, es evidente que una cualquiera de ellas, P, por ejemplo, puede anular la acción de todas las demás. Una fuerza P', igual y opuesta a P, produciría pues por sí el mismo efecto que el sistema de las fuerzas Q, R, S. La fuerza P' es la resultante de las fuerzas Q, R, S, y éstas son sus componentes.

El problema de la *composición de las fuerzas* consiste en hallar la resultante de un sistema cualquiera de ellas. El problema inverso de la *descomposición de las fuerzas* tiene por objeto descubrir el sistema de fuerzas que produce efecto análogo al de una fuerza única dada. Estas fuerzas se suponen aplicadas siempre, sea a un punto material único, sea a un *cuerpo sólido* absolutamente *rígido*, e *indeformable*.

31. Composición y descomposición de las fuerzas concurrentes. — 1º *Caso de dos fuerzas.* — Sean dos fuerzas MA, MB (fig. 26) aplicadas al mismo punto M de un cuerpo sólido. Estas dos fuerzas admiten una resultante, representada en dirección e intensidad por la

diagonal MC del paralelogramo construido sobre las rectas que representan respectivamente las fuerzas.

Inversamente, se puede siempre descomponer una fuerza MC en dos componentes dirigidas siguiendo dos rectas cualesquiera MA, MB, que pasen por su punto de aplicación. Para esto, no hay más que trazar por C dos paralelas CA, CB, respectivamente a MB, MA. Los segmentos MA, y MB, que ellas determinan sobre MX y MY representan dos fuerzas que tienen por resultante MC.

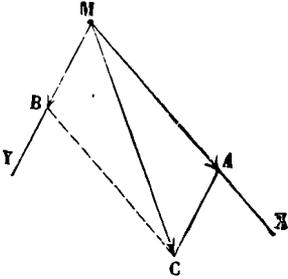


Fig. 26.

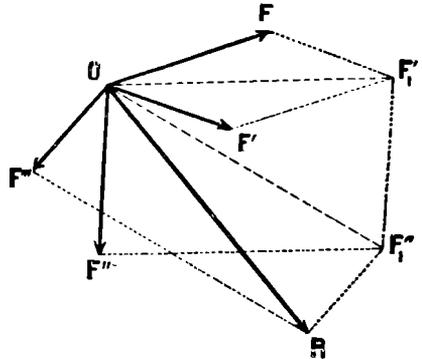


Fig. 27.

2º Caso de un número cualquiera de fuerzas. — Sean F, F', F'', F''' , (fig. 27) 4 fuerzas concurrentes en O: para tener su resultado se puede componer F con F', después la resultante de estas dos fuerzas con F'', y así sucesivamente. De este modo se puede construir desde el punto O una línea quebrada OF', F'', R de las cuales cada lado es igual y paralelo a una de las fuerzas del sistema. La fuerza OR es la resultante del sistema. Esta resultante se llama también *suma geométrica de los vectores* OF, OF', OF'', OF''' .

32. Composición y descomposición de las fuerzas paralelas. — 1º Caso de dos fuerzas paralelas y de la misma dirección. — Dos fuerzas paralelas y de la misma dirección AF, BF' (fig. 28) aplicadas en dos puntos invariablemente unidos A y B, tienen por resultante una fuerza CR paralela a las componentes y cuya intensidad es igual a la suma de las intensidades de las componentes: esta fuerza toca la recta que une los puntos de aplicación de las dos fuerzas en un punto C y la divide en dos segmentos CA y CB, inversamente proporcionales a la intensidades de las componentes.

Resulta pues

$$\frac{CA}{CB} = \frac{F'}{F}$$

2º Caso de dos fuerzas paralelas y de sentidos contrarios. — Sean las dos fuerzas AF y BF' (fig. 29): en general, estas admiten una resultante R, la cual es una fuerza paralela a las componentes de intensidad igual a la diferencia de las intensidades de éstas y

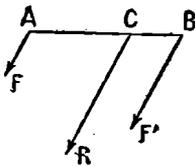


Fig. 28.

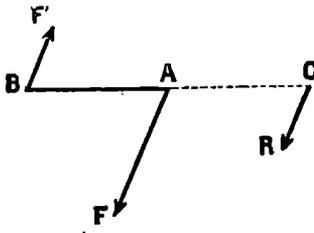


Fig. 29.

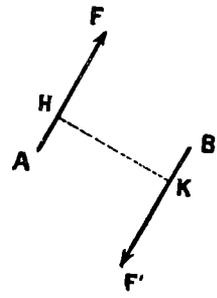


Fig. 30.

que obra en sentido de la más grande. Su dirección encuentra un punto C perteneciente a la recta que une los puntos de aplicación AB de las componentes, fuera de estos dos puntos y el lado de la mayor: así, determina dos segmentos, CA y CB, inversamente proporcionales a las intensidades de las componentes.

Luego

$$\frac{CA}{CB} = \frac{F'}{F}$$

Pares. — Se llama par a un sistema de dos fuerzas paralelas, iguales y de sentido contrario. — En este caso, no existe resultante. Un par (fig. 30) aplicado a un cuerpo tiende a hacerlo girar en un sentido determinado que recibe el nombre de *sentido de rotación* del par. El efecto del par sólo depende del producto de la intensidad F de sus dos fuerzas, por su distancia HK que se denomina *brazo de palanca* del par. Este producto se llama *momento* o *eje del par*.

3º *Caso de un número cualquiera de fuerzas paralelas y del mismo sentido.* — La resultante de estas fuerzas es igual a su suma, paralela a su común dirección y obra en el sentido de ellas.

Centro de fuerzas paralelas. — El punto de apoyo de la resultante se designa con el nombre de *centro de fuerzas paralelas*, y goza de la propiedad siguiente :

Si las fuerzas, sin dejar de ser paralelas, cambian de dirección, sin variar de intensidad ni de punto de apoyo, el centro de las fuerzas paralelas permanece fijo.

33. Máquinas. — Palanca. — Se denomina *máquinas* a unos aparatos que permiten hacer equilibrarse a varias fuerzas, llamadas *resistencias*, o mover los puntos de apoyo de éstas, por medio de otras fuerzas llamadas *potencias*.

La máquina más sencilla es la *palanca*.

I. *Palanca de primer género.* — Supongamos que se trata de levantar un fardo muy pesado. Por debajo de él, se introduce el extremo B de una barra consistente y se coloca un soporte rígido cualquiera en C (fig. 31). Apoyando sobre el extremo A, puede levantarse el fardo, — aplicando una fuerza P (*potencia*) más pequeña que el peso del fardo o fuerza R (*resistencia*).

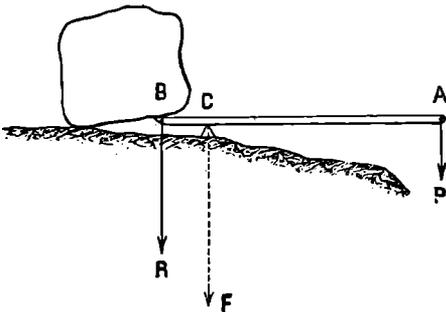


Fig. 31.

Esta barra consistente es una *palanca de primer género*. Se da el nombre de *brazo de palanca de la potencia* y de la *resistencia*, a las longitudes de las perpendiculares CA y CB bajadas del punto de apoyo C a estas fuerzas.

La condición necesaria y suficiente para mantener el sistema en equilibrio es que la potencia y la resistencia estén entre

si en razón inversa de sus brazos de palanca.

En efecto, si aplicamos en C la resultante de las dos fuerzas P y R , no producirá más efecto que el de apoyar la palanca en el soporte C . Luego, según la regla de composición de fuerzas paralelas, tendremos la ecuación de equilibrio,

$$\frac{P}{R} = \frac{CB}{CA}$$

OBSERVACIONES. — De esta ecuación se deducen las consecuencias siguientes :

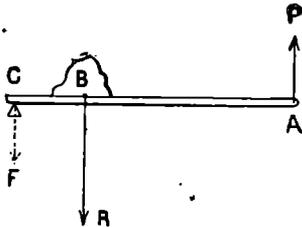


Fig. 32.

1ª La potencia es menor que la resultante cuando su brazo de palanca CA es mayor que el brazo de palanca CB de la resistencia; pero, si el brazo de palanca de la potencia es más pequeño que el de la resistencia, se verifica lo contrario.

2ª Si se suponen constantes la potencia P y el brazo de palanca CB de la resistencia, se puede equilibrar una resistencia R tanto más grande cuanto mayor sea el brazo de palanca CA sobre que actúe la potencia.

II. *Palanca de segundo género.* — Si nos proponemos levantar un fardo colocado en B (fig. 32), ejerciendo una fuerza P en el extremo de una barra rígida, móvil alrededor de un punto C , la barra, en este caso, es una *palanca de segundo género*.

Para que haya equilibrio es preciso que exista la igualdad.

$$\frac{P}{R} = \frac{CB}{CA}$$

En efecto, la resultante de las dos fuerzas paralelas y de sentido contrario P y R debe hallarse aplicada en C.

Por otra parte, CA es siempre mucho mayor que CB, y, por tanto, la potencia siempre es menor que la resistencia.

Un *cascanueces* es una palanca doble de segundo género.

III. *Palanca de tercer género.* — Con una barra móvil alrededor de su extremo C (fig. 33), queremos levantar un bulto colocado en el otro extremo B, aplicando una fuerza intermedia en A. Como se ve, la disposición es inversa á la del caso precedente, y, por lo tanto, ahora, la potencia es más grande que la resultante; pero la condición de equilibrio continúa siendo la misma.

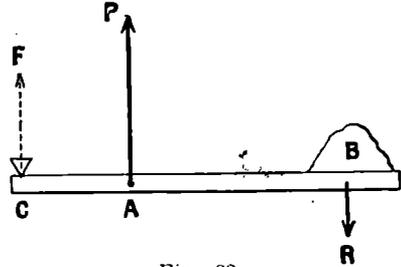


Fig. 33.

En el organismo, los huesos funcionan, generalmente, como palancas de tercer género. Los huesos del antebrazo, por ejemplo, constituyen una palanca, móvil alrededor del codo, y sobre el cual actúa, como potencia, el esfuerzo que ejerce el músculo *biceps*, que se inserta muy cerca del codo, mientras la resistencia actúa en la mano, a una distancia mucho mayor.

34. *Polea fija.* — Es una rueda circular (fig. 34) que puede girar alrededor de un eje

O, que pasa por su centro y es perpendicular á su plano. El eje está sujeto por una pieza en forma de U invertida, llamada *caja*, la cual está fija en un soporte consistente. En la circunferencia de la rueda, hay una hendidura o canal, llamada *garganta*, por la cual pasa la cuerda.

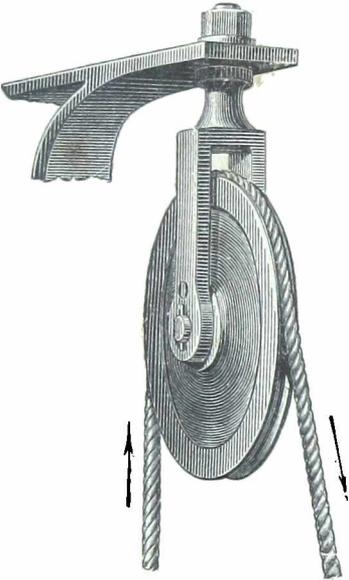


Fig. 34.

Para mantener en equilibrio un fardo B (fig. 35), suspendido de un extremo de la cuerda, hay que

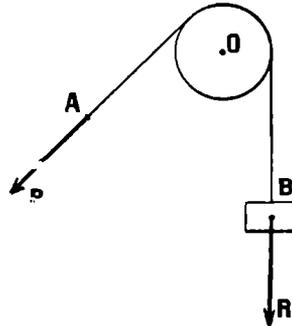


Fig. 35.

tirar del otro, con una fuerza AP igual al peso BR del fardo. Luego la condición de equilibrio de la polea fija es que la potencia sea igual a la resistencia.

35. *Torno.* — Es una máquina compuesta de un cilindro en el cual se enrolla una cuerda, fija a un punto del cilindro, y que sujeta, en el otro extremo, el fardo que se desea levantar (fig. 36). Se hace girar el cilindro por medio de un manubrio *a b m*, de radio mayor que el suyo.

Se demuestra que, para mantener el fardo en equilibrio, hay que aplicar al manubrio una fuerza P perpendicular á su radio (fig. 37) y más pequeña que el peso del fardo. La relación que existe entre la potencia P y el peso del fardo, o resistencia R, es igual a la relación de los radios OA y OM del cilindro y del manubrio.

Luego,

$$\frac{P}{R} = \frac{OA}{OM}$$

36. **Plano inclinado.** — Es un método empleado desde la más remota antigüedad, para levantar bultos muy pesados. Se compone de un plano consistente, inclinado hacia el

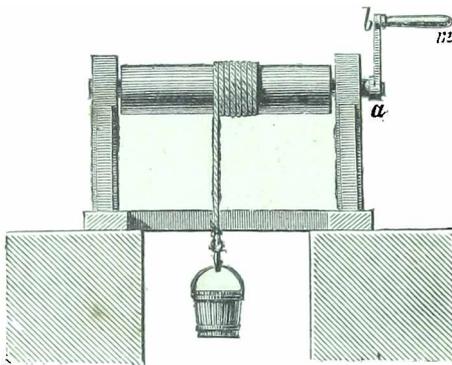


Fig. 36.

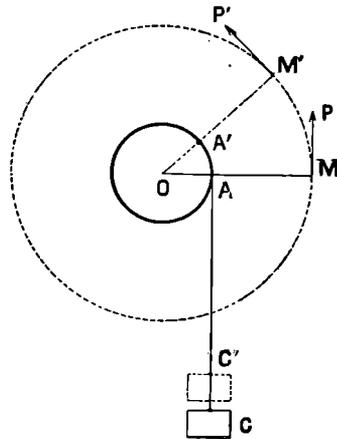


Fig. 37.

horizonte, y que supondremos, ahora, que esté perfectamente liso, y que se halle en él el fardo de la figura 38, cuyo peso es P .

Este peso puede descomponerse en dos fuerzas, una F' , normal al plano, cuyo único efecto es apoyar el cuerpo contra el plano, y que está equilibrada por su resistencia; y otra F , paralela al plano y que hace deslizar el cuerpo. Para mantener el equilibrio basta, evidentemente, aplicar una fuerza F , igual y directamente opuesta a F .

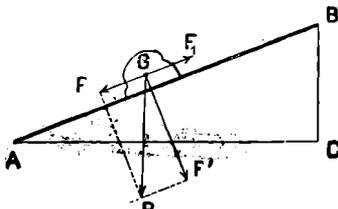


Fig. 38.

Nótese que los triángulos GPF y ABC son semejantes, por tener iguales los ángulos C y F, como rectos, y los P y A por tener sus lados respectivamente perpendiculares.

Luego,
$$\frac{F}{P} = \frac{BC}{AB}.$$

La fuerza F puede expresarse también por otra igualdad. Llamemos α al ángulo BAC que forma el plano con el horizonte: los ángulos α y GPF son iguales, y, por tanto, en el triángulo GPF, tendremos:

$$F = P \text{ seno } \alpha.$$

37. **Máquinas compuestas.** — Las máquinas más complicadas son todas combinaciones de las máquinas simples que acabamos de estudiar. Se llaman *máquinas compuestas**. Utilizan como potencias fuerzas de origen muy distinto: fuerza muscular del hombre y los animales, fuerzas hidráulicas, presión del vapor de agua, fuerzas eléctricas, etc. Más adelante, estudiaremos algunas de estas máquinas, especialmente las máquinas térmicas (346) y los motores eléctricos (854, 870).

* Véase G. MANEUVRIER, *Tratado elemental de mecánica racional y aplicada*.

CAPÍTULO III

GRAVEDAD. — CENTRO DE GRAVEDAD. EQUILIBRIO DE LOS CUERPOS GRAVES

38. **Definición de la gravedad.** — Ya hemos dicho que todos los cuerpos existentes en la superficie de la Tierra *caen* al suelo desde que pierden su sostén o apoyo. Este hecho general se ha expresado diciendo que esos cuerpos son *pesados*. La causa de este movimiento es una fuerza cuyo origen y naturaleza no se conocen *a priori* : se la llama *gravedad*.

Cuanto la simple observación de los hechos ha enseñado acerca de la gravedad, es que se ejerce sin distinción sobre todos los cuerpos sólidos y líquidos, sean cuales fueren las condiciones en que se encuentren colocados. Para demostrar que los gases entran también en esta categoría, se ha necesitado recurrir a los experimentos. Y si algunos cuerpos no parecen caer (el humo y los globos aerostáticos que se elevan en la atmósfera), esto depende precisamente de que el aire es pesado y de que ejerce sobre los cuerpos sumergidos en él un impulso vertical superior a la acción de la gravedad.

Cuanto a los caracteres mecánicos de esta fuerza, a su naturaleza y origen físicos, no ha sido posible determinarlos más que mediante un estudio experimental y racional de sus efectos.

39. **Dirección de la gravedad.** — **Plomada.** — La dirección de la fuerza, en un punto cualquiera, estará dada exactamente por medio de un instrumento muy sencillo : la *plomada*.

Compónese de un hilo perfectamente flexible de que se encuentra suspendida una pequeña bala de plomo (fig. 39). Fijando este hilo por su extremidad superior y abandonándolo a sí mismo, toma naturalmente, cuando queda en equilibrio, la dirección de la gravedad. En efecto, por causa de su flexibilidad, sigue exactamente la dirección que le imprime el cuerpo grave, que es la del descenso libre y, por tanto, de la gravedad.

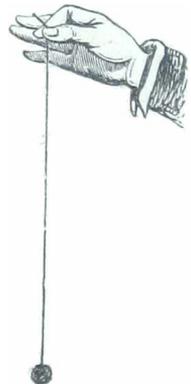


Fig. 39.

De modo que la dirección de la gravedad queda definida geométricamente por esta propiedad del instrumento expresado : *La dirección de una plomada en equilibrio es normal a la superficie libre de las aguas tranquilas o de los líquidos en reposo*. La demostración de esta propiedad resulta de una ley de la reflexión de la luz : *La imagen de una recta luminosa, obtenida en una superficie plana reflectora, es una recta simétrica de la primera respecto del plano del espejo*.

Ahora bien, si se suspende una plomada sobre un baño de mercurio (fig. 40), normalmente a la superficie plana del líquido, su imagen

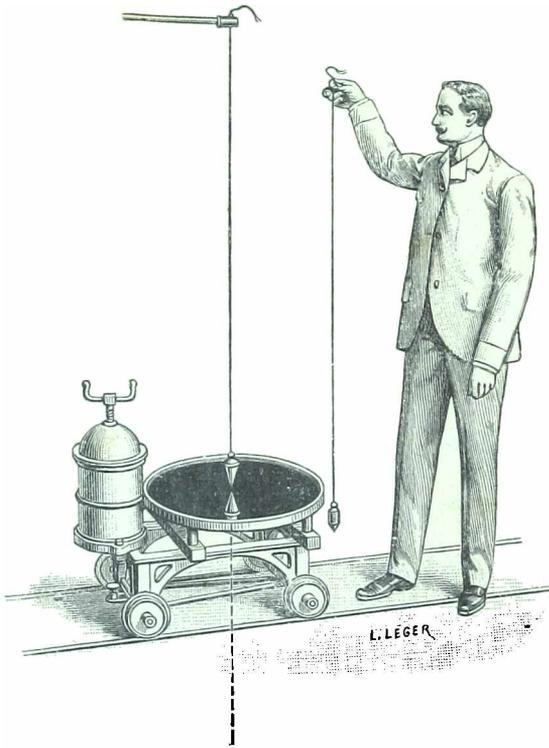


Fig. 40.

vista en el mercurio no podrá serle simétrica más que estando exactamente en su prolongación. Fácil es comprobarlo. Basta que un observador coloque otra plomada entre su vista y la primera de modo que esta última quede completamente oculta: así, observará que la imagen del hilo queda oculta a la vez que la plomada misma; luego esta imagen se encuentra en el plano determinado por los dos hilos paralelos. Tomando otra posición respecto de la plomada fija, el observador llegará a idéntico resultado, es decir, que podrá ocultar al mismo tiempo la plomada y su imagen mediante la interposición de la segunda plomada: luego esta imagen se encuentra

comprendida también en el nuevo plano determinado por las dos plomadas paralelas. Como dicha imagen está, al mismo tiempo, en dos planos, se encuentra también en su intersección, que es precisamente la plomada fija; luego la imagen de ésta se halla en su prolongación misma: luego la dirección de la plomada es normal a la superficie plana del mercurio.

Aplicaciones de la plomada. — La plomada se emplea diariamente,

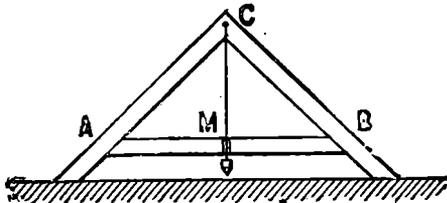


Fig. 41.

para conocer la verticalidad de los muros y paredes en construcción. Para esto, basta suspender la plomada al lado del muro y apreciar el paralelismo.

La plomada es asimismo el órgano esencial del nivel de albañilería. Compónese éste de un caballete triangular de madera ABC (fig. 41), de cuyo vértice se halla suspendida una plomada, la cual, cuando se coloca el nivel sobre un plano horizontal, debe pasar por el centro M de AB.

40. Vertical. — Horizontal. — La dirección de la plomada en un

lugar, es decir, la dirección de la gravedad en éste, se denomina *vertical del lugar*.

Todo plano que pasa por la vertical es un plano se llama *plano vertical*.

Todo plano perpendicular a la vertical es un *plano horizontal*. Por ejemplo, la superficie de las aguas tranquilas, por lo menos en las inmediaciones de la vertical, es un plano horizontal.

Toda línea recta trazada en un plano horizontal es una *horizontal*.

OBSERVACIONES. — 1º Si la superficie de las aguas tranquilas fuera plana, todas las verticales de los diferentes puntos serían paralelas entre sí. Pero se sabe que la superficie terrestre, hecha abstracción de las desigualdades accidentales del suelo, es una superficie convexa. La vertical de un lugar es, pues, una recta perpendicular al plano tangente en un punto de una superficie convexa, plano tangente que, por lo demás, se confunde con la superficie misma en cierta extensión; de aquí resulta que las verticales de los diferentes lugares no son rectas paralelas.

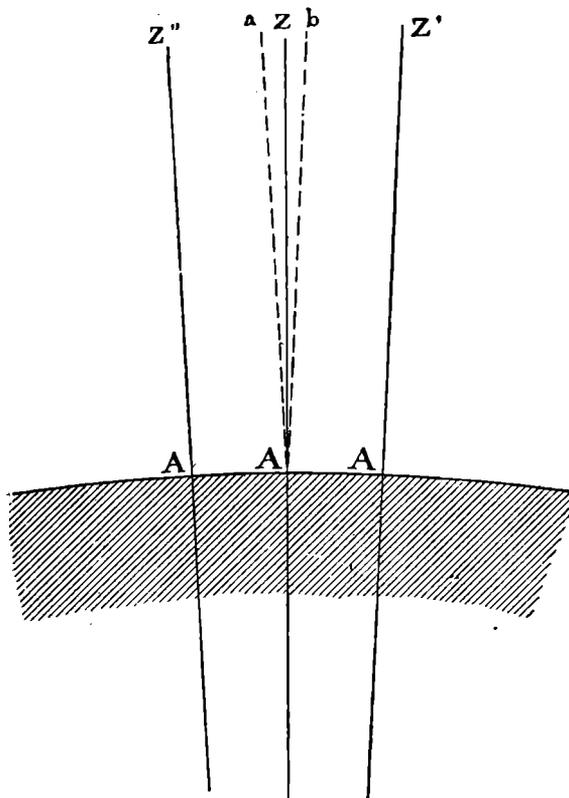


Fig. 42.

Esta falta de paralelismo es difícil de observar tratándose de pequeñas distancias. Así, dos verticales cuya distancia horizontal es de 31 metros no forman más que un ángulo de 1". Se necesita una distancia de 1860 metros, para formar un ángulo de 1', y de 111 kilómetros, para un grado.

2º Si la superficie terrestre fuera perfectamente esférica, todas las verticales, Z, Z', Z" etc. (fig. 42), serían perpendiculares a planos tangentes a la esfera, e irían a cortarse en su centro. Podría, pues, decirse que, *en cada lugar, la gravedad se dirige hacia el centro de la Tierra*. Mas se sabe que nuestro planeta es un globo esferoidal, aplastado en sus dos polos, que, además, presenta ciertas irregularidades de forma, en sus meridianos y paralelos. Además, por causa del movimiento de rotación de la Tierra, hay que hacer intervenir la fuerza centrífuga, cuya acción es tal que, aunque el globo terrestre fuera

perfectamente esférico, la gravedad no iría dirigida exactamente hacia su centro.

41. **Intensidad del peso de un cuerpo.** — Si de un dinamómetro sensible, se suspende un cuerpo grave, se comprueba que su peso es constante, en un lugar determinado. El peso de un cuerpo es, pues, una fuerza *constante en magnitud*. Ya hemos visto (39), que también lo es en *dirección*, en un lugar dado.

42. **Centro de gravedad de los cuerpos homogéneos.** — Si se divide en fragmentos un cuerpo, cada uno de éstos es pesado; de ahí se deduce que la gravedad se ejerce también en las menores partículas de un cuerpo y se infiere que esta fuerza es una propiedad molecular general de los cuerpos. Como los pesos respectivos de tales partículas son fuerzas paralelas, tienen una resultante, que es igual a su suma y constituye el *peso* del cuerpo. Se aplica a un punto que se llama *centro de gravedad* del cuerpo.

La posición del centro de gravedad no varía cuando se cambia la orientación del cuerpo respecto a la vertical del lugar. En ese caso, se encuentra, por ejemplo, la barra AB (fig. 43, I), cuyo centro de gravedad G, situado en su punto medio, conserva la misma posición si se orienta la barra en otro sentido (fig. 43, II). En efecto, el centro de gravedad de un cuerpo es el centro de un sistema de fuerzas paralelas (32). Si se altera la orientación del cuerpo, lo que equivale a cambiar la orientación de

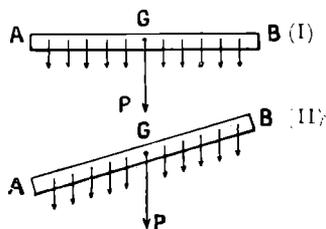


Fig. 43.

todas las fuerzas con él relacionadas, el centro de las fuerzas paralelas conserva una posición invariable.

La posición del centro de gravedad está, pues, determinada, en cada cuerpo, por su forma exterior y por el modo de repartición de su masa. El caso más importante es el de cuerpos *homogéneos*, esto es, de cuerpos cuya materia se halla repartida uniformemente por toda su extensión. En todos estos cuerpos, la posición del centro de gravedad sólo depende de su figura. Si esta figura es geométrica, la investigación del centro de gravedad es un problema de Geometría o de análisis, más o menos complicado; pero, siempre, posible*.

Así, el centro de gravedad de una esfera homogénea reside en su centro de figura; el de un cilindro, en medio de su altura; el de una superficie triangular, en el punto de intersección de sus medianas; el de un cono, en la cuarta parte de su altura, contada a partir de la base; etc.

Caso de cuerpos huecos. — En general, el centro de gravedad de un cuerpo hueco no forma parte de su masa. Por ejemplo, el centro de gravedad de una anilla se halla en el centro de ésta. No obstante, puede reemplazarse el conjunto de fuerzas de la gravedad por una sola

* Véase G. MANEVRIER. *Tratado elemental de mecánica racional y aplicada*.

fuerza aplicada al centro de gravedad. Basta suponer que este punto se halla unido a la materia del cuerpo por un lazo consistente y sin peso.

43. **Equilibrio de graves suspendidos.** — Para mantener en equilibrio un cuerpo sólido grave, es menester sostenerlo. Esto puede efectuarse de varias maneras según los casos.

I. *Cuerpo móvil alrededor de un eje horizontal.* — Es el caso de una rueda o un disco (fig. 44).

Equilibrio indiferente. — Si el eje pasa exactamente por el centro de gravedad (fig. 44, I), sea cual fuere la posición del cuerpo, su peso no puede producir ningún movimiento :

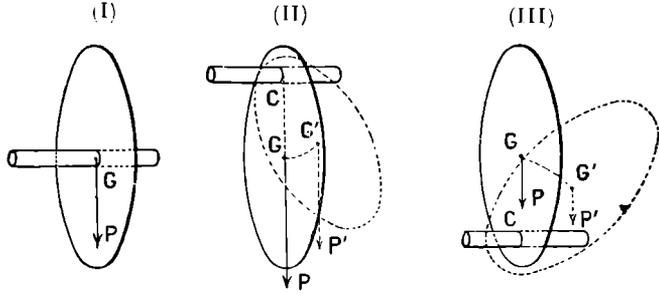


Fig. 41.

se halla siempre equilibrado por una resistencia igual y opuesta, ejercida por el eje. Por tanto, el cuerpo queda en equilibrio en todas sus posiciones, y se dice que se halla en *estado de equilibrio indiferente*.

Equilibrio estable y equilibrio inestable. — En caso de que el eje no pase por el centro de gravedad, no hay más que dos posiciones en que el peso del cuerpo sea destruido por la resistencia del eje : son éstas, las posiciones en que la vertical del centro de gravedad encuentra al eje.

Si el centro de gravedad se halla entonces debajo del eje (fig. 44, II), se dice que el cuerpo se encuentra en *estado de equilibrio estable*; puesto que, si se le aparta de esta posición, su peso $G'P'$ tiende a llevarlo a ella y lo lleva, en efecto, tras una serie de oscilaciones, cuando se abandona el cuerpo a sí mismo.

Si el centro de gravedad reside por cima del eje (fig. 44, III), el equilibrio se llama *inestable*, porque, por poco que se separe el cuerpo de su posición de equilibrio, su peso $G'P'$ tiende a separarlo aun más, para conducirlo a la posición de equilibrio estable.

OBSERVACIONES. — 1ª En la posición de equilibrio estable, el centro de gravedad ocupa la posición más baja, compatible con el modo de suspensión del cuerpo.

Por el contrario, en la posición de equilibrio inestable, el centro de gravedad se halla a la mayor altura posible.

Finalmente, en la posición de equilibrio indiferente, el centro de gravedad permanece a altura invariable cuando se hace girar el cuerpo alrededor de su eje de suspensión.

2ª En la posición de equilibrio inestable, el menor tropiezo basta para que se desplome el cuerpo; por consiguiente, no se podría realizar cierta posición, si no hubiera algún roce del eje en sus soportes.

II. *Cuerpo sólido móvil alrededor de un punto.* — Sea, por ejemplo, una barra CG (fig. 45) colgada por una anilla. En este caso, hay, tam-

bién, dos posiciones de equilibrio posibles, si el centro de gravedad no coincide con el punto de suspensión, y son las posiciones para las cuales el centro de gravedad encuentra al punto de suspensión. Si el centro de gravedad queda, pues, debajo del punto de suspensión (fig. 45, I), el equilibrio es estable*; si permanece encima (fig. 45, II), es inestable.

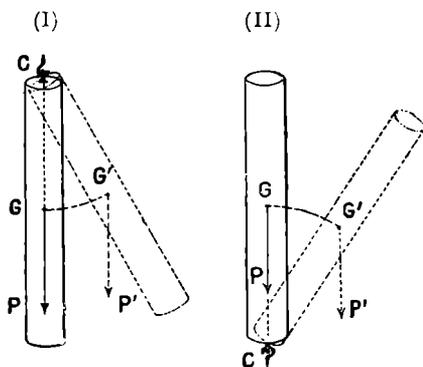


Fig. 45.

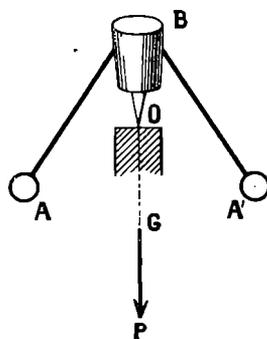


Fig. 46.

Si el punto de suspensión coincidiera con el centro de gravedad, el cuerpo quedaría en equilibrio indiferente, para cualquiera posición.

También se realiza el equilibrio estable en los juguetes llamados *equilibristas*. Puede construirse uno muy sencillo, adaptando a un tapón de corcho B (fig. 46) una punta O y dos varillas terminadas por dos bolas pesadas AA'. En este caso, el centro de gravedad reside en G. Si se coloca la punta en un soporte rígido cualquiera, el sistema se instala en éste, por sí mismo, de manera que la vertical del centro de gravedad pase por el punto O. Separado de esta posición, vuelve a ella, después de una serie de oscilaciones.

44. Equilibrio de sólidos que descansan en un plano horizontal. —

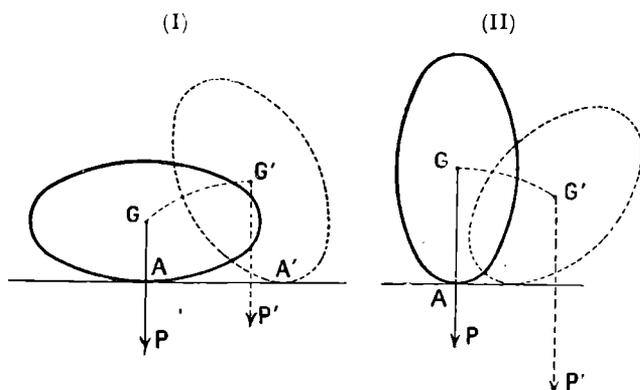


Fig. 47.

1º Caso de un solo punto de apoyo. — Es el caso de un huevo que descansa sobre una mesa. Las posiciones de equilibrio, son aquellas para las cuales la vertical del centro de gravedad pasa por el punto de apoyo. En este caso, el peso no puede producir más efecto que el apoyar el cuerpo en el plano y

se halla equilibrado por la resistencia normal que el plano ejerce.

La posición en que el centro de gravedad permanece lo más bajo

* Es el caso en que se hallan los ahorcados.

posible (fig. 47, I) es la única estable, porque, si se aparta el cuerpo de esta posición, su peso tiende a volverlo a ella. La posición en que el centro de gravedad se encuentra a la mayor altura posible (fig. 47, II) es, por el contrario, inestable.

Si la forma del cuerpo es tal que, en todo cambio de posición, el centro de gravedad conserve una altura constante, el cuerpo permanece en equilibrio indiferente en cualquiera posición. En este caso se halla la esfera que rueda por un plano horizontal; el centro de gravedad queda siempre a la misma distancia del plano y la vertical de este punto pasa siempre por el punto de apoyo.

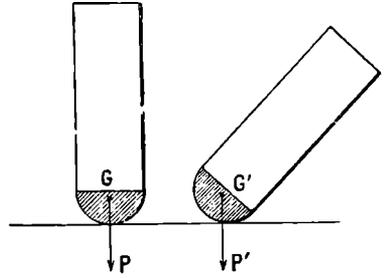


Fig. 48.

Asimismo, se explica el funcionamiento de ciertos juguetes que nunca pueden volcarse, como el que se construye sencillamente, fijando un clavo pesado, a un cilindro muy ligero de médula de saúco (fig. 48); el centro de gravedad queda colocado de tal modo que, si se aparta el cuerpo de su posición de equilibrio, que es la posición vertical, tiende a recobrarla.

2º *Caso de una recta de apoyo.* — Es el caso de un cilindro o de un cono que descansan en un plano horizontal, según una generatriz. Las posiciones de equilibrio son aquellas para las cuales la vertical del centro de gravedad encuentra a la línea de apoyo. El equilibrio puede ser estable, inestable o indiferente, según que, al separar el cuerpo de su posición de equilibrio, el centro de gravedad suba, baje o permanezca a una altura constante. Para formarse idea más clara de los dos primeros casos, basta considerar un cilindro elíptico. Del mismo modo, un cilindro y un cono circulares están en equilibrio indiferente en toda posición cuando descansan, sobre una generatriz, en un plano horizontal.

3º *Caso de una base de apoyo.* — En general, llámase *base de apoyo* o *de sostén* de un cuerpo descansando en un plano horizontal, el polígono (o la curva) convexo formado uniendo ciertos puntos de apoyo bien elegidos, de modo que no quede ninguno afuera. Para los cilindros A y B (fig. 49 y 50) la base de apoyo es la base misma del cilindro.

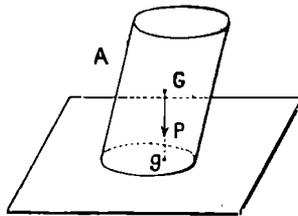


Fig. 49.

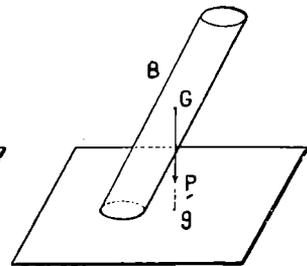


Fig. 50.

Para que un cuerpo determinado se halle en equilibrio, es preciso y basta que la vertical del centro de gravedad pase por el interior de la base de apoyo.

En efecto, es evidente que el cilindro A (fig. 49) está en equilibrio;

puesto que su peso sólo tiende a apoyarlo contra su soporte. El cilindro B (fig. 50), por el contrario, no podría conservar equilibrio, si se le abandonase a sí mismo.

Las torres de Pisa y de Bolonia, que están tan inclinadas hacia el horizonte que parecen amenazar con su caída al transeunte, se mantienen en equilibrio porque la vertical del centro de gravedad del edificio pasa por el interior de la base.

Un hombre se halla tanto más firme sobre sus pies, cuanto más extensa es la base de sustentación que estos comprenden; porque, entonces, puede aquél dar mayor amplitud a sus movimientos, sin que la vertical trazada por su centro de gravedad se encuentre fuera de esta base. Si se coloca sobre un solo pie, disminuye su estabilidad, y disminuye aun más, si se empina un poco sobre este pie.

45. Determinación empírica del centro de gravedad de los cuerpos sólidos.

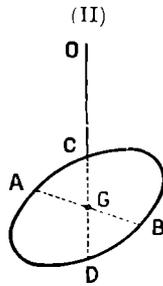
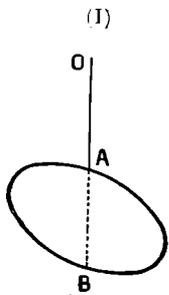


Fig. 51.

— Tomemos un cuerpo sólido cualquiera, homogéneo o heterogéneo. Suspendámoslo de una cuerda, sucesivamente en dos posiciones distintas (fig. 51, I y II): busquemos, luego, el punto en que, en la segunda posición, la dirección CD va a cortar a la dirección AB, que tenía la cuerda en la primera: este punto es el centro de gravedad deseado. En efecto, en cada posición,

no puede establecerse el equilibrio hasta que el centro de gravedad se sitúe en la vertical del punto de unión de la cuerda; de ahí resulta que el centro de gravedad debe estar colocado en las dos direcciones de la cuerda a la vez y, por consiguiente, en su punto de intersección.

Si se trata de un cuerpo de gran masa, se procura ponerlo en equilibrio sobre la arista de un cuchillo fuerte de acero. Conseguido esto, el plano vertical que pase por dicha arista, contiene necesariamente el centro de gravedad. Este equilibrio se realiza también para otras dos posiciones del cuchillo. El único punto de intersección de los tres planos verticales que corresponden a las tres posiciones de la arista del cuchillo es el centro de gravedad.

CAPÍTULO IV

MEDIDAS DE PESOS Y MASAS. — BALANZA. —
DEFINICIÓN DE DENSIDADES Y PESOS ESPECÍFICOS

46. **Balanzas.** — Las *balanzas* son aparatos destinados a comparar los pesos de los cuerpos entre sí.

La balanza ordinaria (fig. 52) consiste en una palanca *de primer género* *mn*, llamada *fiel*, de cuyas extremidades se cuelgan dos *platillos*

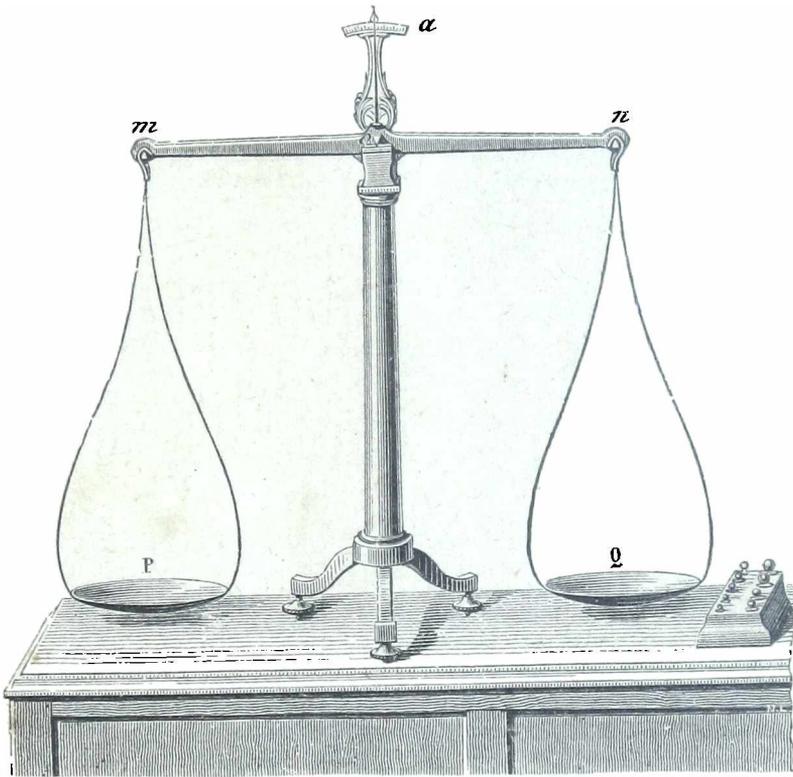


Fig. 52.

P Q, del mismo peso. El *fiel* está atravesado en su parte media por un prisma de acero, llamado *cuchillo*, cuya arista viva constituye el *eje de suspensión* del *fiel*; esta arista descansa por sus dos extremos sobre dos piezas pulimentadas de ágata o de acero, que constituyen la *chapa*, y esta disposición reduce mucho el rozamiento del eje. En los extremos, se adaptan dos prismas más pequeños, cuyas aristas vivas están vueltas hacia arriba y son paralelas a las del *cuchillo* central. De estas aristas, cuelgan, por medio de garfios, los *platillos* P y Q. Es

indispensable que las tres aristas vivas, o , m y n sean rigurosamente paralelas entre sí y que se hallen en un mismo plano.

Por fin, en la parte superior del fiel y perpendicularmente a su dirección, se encuentra fija una larga aguja que oscila delante de un arco graduado a , fijo y sostenido por una columna de latón donde descansan la chapa y el fiel.

En las balanzas más ordinarias, la aguja está dirigida de abajo arriba y tiene por consiguiente un desarrollo limitado, describiendo un arco de magnitud media. En las balanzas actuales, aun cuando sean poco precisas, se vuelve la punta hacia abajo (fig. 61), lo que da a la aguja mayor longitud y más recorrido, y a la balanza sensibilidad superior, pues así pueden observarse movimientos muy pequeños del fiel.

La columna descansa en un pie de tornillos de nivel, por medio de los cuales se le da la posición vertical.

Cajas de pesas marcadas. — A cada aparato, va unida una *caja de pesas*, que contiene una serie de masas (vulgarmente llamadas *pesas marcadas*) graduada en gramos-masas (56).

Las pesas usuales constituyen tres series: las *pesas grandes*, que comprenden desde el kilogramo hasta 50 kilogramos; las *pesas medias*, del gramo al kilogramo, y las *pesas*

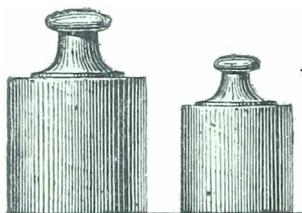


Fig. 53.

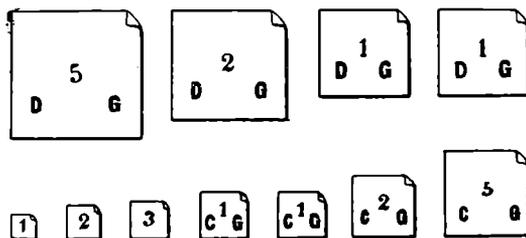


Fig. 54.

pequeñas, desde el miligramo y sus subdivisiones, hasta el gramo. Las dos primeras series son las únicas que sirven para usos comerciales. Las pesas pequeñas, se emplean en las balanzas de los laboratorios.

Las pesas medias son de latón y de forma cilíndrica (fig. 53). Las pequeñas, son de platino o latón; generalmente, son placas cuadradas, muy delgadas, uno de cuyos ángulos se halla doblado a fin de que puedan cogerse con pinzas (fig. 54).

47. Teoría de la balanza. — Cuando la barra o *fiel* está sin platillos, se dispone de modo que la vertical de su centro de gravedad corresponda con el eje de suspensión. Luego para poder realizar un equilibrio estable, es necesario que el centro de gravedad del fiel esté debajo de la arista del cuchillo. Si el fiel es perfectamente simétrico, como dimensiones y como repartición de su masa, en su posición de equilibrio, entonces es horizontal.

Si se concibe un plano vertical perpendicular a las aristas de los tres cuchillos ese plano corta las aristas en los puntos O , m , n (fig. 55). El punto O se llama *punto de suspensión* del fiel; los puntos m y n se llaman *puntos de apoyo* o *puntos de suspensión* de los platillos. Los *brazos del fiel* son las distancias Om y On .

Cuando se agregan los platillos, sus pesos respectivos se aplican

siempre a los extremos m n del fiel, a causa de la movilidad de su suspensión: luego la resultante de estas dos fuerzas paralelas, sea cual fuere la posición del fiel, se aplica al mismo punto de la recta mn . Si este punto es el centro de suspensión O (fig. 55), la posición de equilibrio que tenía el fiel solo no ha cambiado: pero cambia en el caso contrario, y el fiel se coloca de tal manera que la resultante de los pesos del fiel y de los platillos juntos coincide con el eje de suspensión. En general, el constructor procura, para comodidad de las operaciones, que el fiel esté horizontal en la posición de equilibrio con los platillos vacíos. Entonces la aguja está enfrente del cero de la graduación.

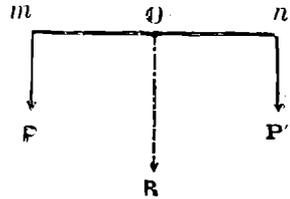


Fig. 55.

Además, es muy fácil corregir el pequeño defecto de la balanza en que no concurren estas condiciones, añadiendo el sobrepeso necesario a uno de los platillos o al brazo de la barra.

48. Exactitud de la balanza. — Simple pesada. — Definición. — Se dice que una balanza es exacta, cuando su fiel conserva la misma posición de equilibrio, estando los platillos vacíos o cargados con pesos iguales.

Cuando una balanza es exacta, se puede determinar con ella el peso de un cuerpo, mediante una *simple pesada*. Para esto, colócase el peso en uno de los platillos, y, en el otro, se introducen pesas hasta que la aguja quede en el *cero*, es decir, el fiel en su posición inicial de equilibrio. La suma de esas pesas representa el peso del cuerpo.

Condición. — La condición necesaria y suficiente para que una balanza sea exacta es que los dos brazos del fiel sean iguales.

Si suponemos un plano vertical que pase por el eje de simetría del fiel, este plano corta a las aristas de los tres cuchillos, en los puntos O , m y n (fig. 55). El punto O se denomina *punto de suspensión* del fiel; y mn se llaman *puntos de suspensión* de los platillos. Los brazos del fiel son las distancias Om y On .

Demostración. — Coloquemos en los platillos dos pesos iguales P y P' . Su resultante R pasará por el centro de mn (fig. 55). Si este punto se halla en el eje de suspensión, la resultante quedará destruida por la resistencia del soporte y el fiel conservará la misma posición que antes de poner los pesos; pero si el eje de suspensión no pasa por el centro de mn , el fiel se inclinará.

Conservación de la exactitud. — Es necesario que la suspensión de los platillos sea muy móvil. En efecto, sean cuales fueren la posición del cuerpo en el platillo y la inclinación de la balanza, se coloca el platillo de manera que la dirección de la resultante de los pesos del cuerpo y del platillo encuentre al eje de suspensión de éste (fig. 56), es decir que el brazo del fiel sea igual a Om . Si los platillos estuviesen colgados fuertemente, los brazos del fiel variarían con su inclinación y con la posición de los cuerpos en los platillos.

Verificación de la exactitud. — Se verifica la exactitud de una

balanza, colocando pesos en sus platillos de manera que la aguja llegue al *cero*, e invirtiendo luego los pesos : si la balanza es exacta, el fiel continuará en el *cero*.

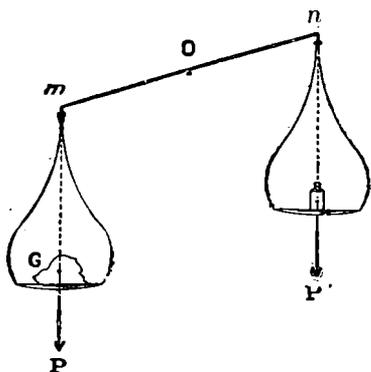


Fig. 56.

En efecto, si $Om = On$ (fig. 55), los pesos que se habían puesto para que estuviera la aguja en *cero*, eran iguales; luego cambiándolos de platillo no se ha alterado el equilibrio del fiel. Pero si, por ejemplo, Om era mayor que On se ha debido poner en el lado de m , un peso menor que el puesto en el lado de n . Luego si se cambian los pesos, se pone el menos pesado en el lado del brazo menor de la palanca y el más pesado en el lado del brazo mayor, es evidente que el fiel se inclina de este lado.

49. Doble pesada. — Tara. — Cuando *no es exacta* la balanza, se emplea el método de Borda, que consiste en dos pesadas simples sucesivas. En uno de los platillos, se coloca el cuerpo que se quiere pesar y se le equilibra en el otro con perdigones o arena : esto se llama *hacer la tara*; después, se retira del primer platillo el cuerpo y se le reemplaza con pesos conocidos hasta que el equilibrio se restablezca otra vez. La suma de estos pesos representa exactamente el peso del cuerpo; pues en éstas dos operaciones el cuerpo y los pesos actúan alternativamente sobre el mismo brazo de palanca para equilibrar el mismo peso, el de la tara.

En el método, llamado de *carga constante*, empleado especialmente cuando hay que hacer una serie de pesadas, se modifica el método de Borda esta manera : En uno de los platillos Q, se pone, como tara, una sola pesa más pesada que los cuerpos que se van a pesar (y cuyos pesos se han tomado de antemano). En el otro platillo P se pone una serie de pesas divisionarias, equilibrando la tara. En seguida se coloca un cuerpo A en P, y, para restablecer el equilibrio, se quitan pesas, cuya suma es igual al peso de A. Cuando se quita A, la balanza está lista para el peso de otro cuerpo, sin necesidad de modificar la tara. Este método tiene la ventaja de ser rápido y de no emplear, como tara, ninguna substancia capaz de ensuciar los platillos de la balanza.

50. Condiciones de sensibilidad. — *Definición.* — *Dícese que una balanza es sensible cuando indica, mediante notable inclinación del fiel, pequeñas diferencias entre los pesos que se trata de comparar.*

Así, se dirá que una balanza es *sensible al miligramo*, si la aguja se mueve *visiblemente* cuando añadimos un miligramo a uno de los platillos, después de obtenido el equilibrio.

Condiciones. — Una balanza es tanto más sensible :

1º *Cuanto más largos son los brazos del fiel.*

En efecto, supongamos que los dos extremos del fiel sean iguales, y representemos por P y Q (fig. 57) dos pesos desiguales aplicados a los dos extremos del fiel. La mayor de estas dos fuerzas, P, puede descomponerse en una fuerza de intensidad igual a Q, y otra fuerza de

intensidad $P - Q$. Aplicadas en m' y n' las dos fuerzas iguales a Q , reünense en una sola fuerza $2Q$, aplicada al punto O y destruída por la resistencia del soporte. En consecuencia, la fuerza que hace inclinar el fiel es el exceso de pesos $(P - Q)$ aplicado al brazo de la palanca Od ; pero éste es tanto mayor cuanto más largo es el brazo del fiel: luego, la acción de $(P - Q)$ aumenta con la longitud del fiel.

2º *Cuanto menor es el peso del fiel.*

3º *Cuanto más cerca del eje de suspensión está el centro de gravedad g del fiel.*

En efecto; la resistencia que se opone a la inclinación del fiel es

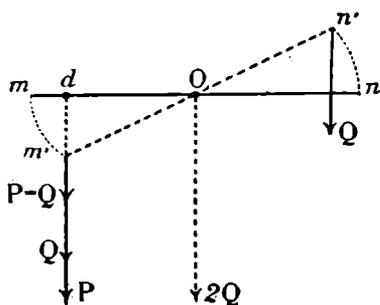


Fig. 57.

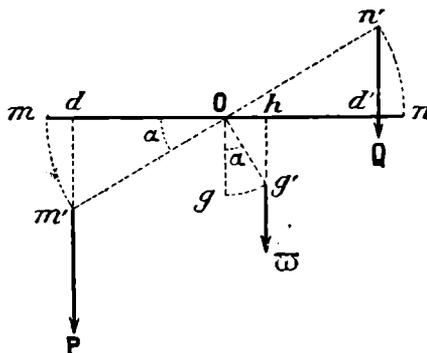


Fig. 58.

precisamente el peso ω aplicado al brazo de palanca Oh (fig. 58), y Oh es la proyección de Og' ($= Og$: luego, mientras más pequeñas sean las cantidades ω y Og , más débil será la resistencia a la inclinación).

4º *Si los tres puntos de suspensión de los platillos y del fiel están en línea recta, la sensibilidad queda independiente de la carga total.*

Condición de construcción. — Para que las condiciones precedentes tengan una eficacia real y durable, es preciso que la construcción de la balanza reúna las dos condiciones siguientes :

1º *El fiel debe permanecer inflexible en el límite de carga de la balanza; pues si se dobla, no sólo puede bajar su centro de gravedad, sino también los puntos de amarre de los platillos.*

2º *El rozamiento en los puntos de apoyo del cuchillo y en los de amarre de los platillos, debe ser lo más pequeño posible. Para obtener este resultado, se usan, en las balanzas de precisión, chapas perfectamente pulimentadas de ágata*.*

51. *Demostración algebraica.* — *Caso de un fiel recto.* — Supongamos iguales los brazos de la balanza y sean P y Q los pesos suspendidos de los dos extremos (comprendiendo el peso de los platillos). Sea ω el peso del fiel. La condición de equilibrio es : *la suma algebraica de los momentos con respecto al eje O es nula*, condición que se expresa :

$$P \times Od - Q \times Od' - \omega \times Oh = 0.$$

y, teniendo en cuenta que $Od' = Od$ y designando por p la diferencia $P - Q$, resulta

$$[1] \quad p \times Od = \omega \cdot Oh.$$

Llamemos α al ángulo mOm' que representa la inclinación del fiel, y d , a la distancia Og . El triángulo rectángulo dOm' nos da

$$Od' = Om' \cos. \alpha = l \cos. \alpha.$$

* En las balanzas que actualmente se construyen no se emplea el acero para evitar las atracciones magnéticas.

y el triángulo Ohg' da $Oh = d \text{ seno } \alpha$.

Substituyendo tendremos :

$$[2] \quad pl \cos. \alpha = \omega d \text{ seno } \alpha,$$

de donde

$$[2 \text{ bis}] \quad \text{tg. } \alpha = \frac{pl}{\omega d}.$$

Ahora bien, el ángulo α es, generalmente, lo bastante pequeño para que pueda tomarse su tangente trigonométrica en vez del arco α , que mide la inclinación y, por consiguiente, la sensibilidad de la balanza : luego la fórmula [2 bis] comprende las tres primeras condiciones.

Además, la sensibilidad es independiente de la carga total; puesto que ésta ($2Q + p$), no entra en la fórmula.

52. **Balanzas de precisión.** — Las reglas prácticas que deben regir la construcción de estos instrumentos se deducen de la teoría antes expuesta. Débese : 1° hacer rigurosamente iguales los dos brazos del fiel; 2° darles al mismo tiempo mucha longitud y gran ligereza; 3° disponer en un mismo plano horizontal y en direcciones paralelas los tres ejes de suspensión del fiel y de los platillos; 4° colocar el centro de gravedad de la parte móvil por debajo del punto de suspensión y más o menos cerca de éste, según el grado de sensibilidad que se desea obtener.

Por desgracia, no es posible pasar de ciertos límites en la realización simultánea de estas condiciones, porque en cierto modo son contradictorias. Así, no es posible prolongar l sin aumentar ω . Y hasta han llegado los constructores empíricamente a la conclusión que para no poner en peligro la rigidez de los fieles debe aumentarse ω más rápidamente que l ; así, la tendencia actual es fabricar balanzas de fiel pequeño.

Desde el punto de vista práctico puede decirse que si las aristas de los cuchillos fueran perfectamente vivas, y estuvieran perfectamente pulimentados los planos de ágata, la sensibilidad no tendría límite, teóricamente, bajo la condición de que se empleara un método óptico conveniente para apreciar los movimientos más ínfimos de la aguja indicadora. En realidad, la sensibilidad es limitada; pero con una buena balanza se podría pesar la centésima de miligramo, si no debiera temerse que semejante pesada fuera alterada por el más ligero accidente, pongamos como ejemplo, por la caída del más mínimo grano de polvo en uno de los platillos.

Así es que, ordinariamente, no se aprecia más que la vigésima de miligramo,

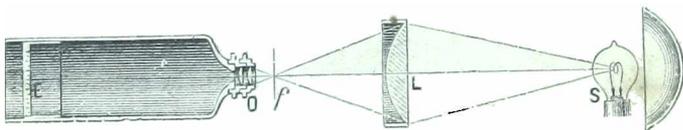


Fig. 59.



Fig. 60.

lo cual se logra por un método más perfecto, gracias a una disposición especial, adoptada en las balanzas de la casa Collot (fig. 59).

La aguja lleva en su parte inferior un anillo (fig. 60) atravesado por un hilo muy fino f (fig. 59), dirigido como el eje mismo de la aguja. Iluminábasele vivamente concentrando allí los rayos de un foco muy brillante y de pequeñas dimensiones, condiciones que presenta una pequeña lámpara eléctrica de incandescencia S. El haz luminoso incide después sobre un sistema óptico, constituido por un objetivo de microscopio, el cual produce una imagen muy aumentada del hilo; éste va a proyectarse en una pequeña pantalla E de vidrio sin pulimentar, provisto de una escala graduada.

OBSERVACIÓN. — Dispónese generalmente el aparato de manera que una división del arco ordinario (1 milímetro próximamente) corresponda a un aumento de carga de 4 miligramos, y una división de la escala en vidrio sin pulimentar a 1/5 de miligramo. Esto permite abreviar considerablemente las pesadas de precisión, apreciar y medir fácilmente en ella los movimientos.

Detalles de construcción. — *Urna y peana.* — Para ponerla a cubierto del polvo y preservarla de la acción oxidante del aire húmedo, lo mismo que de las agitaciones del ambiente durante la pesada, se la guarda en una urna de vidrio, cuya cara anterior se abre a voluntad para permitir practicar las pesadas (fig. 61). La peana que sostiene el instrumento es independiente de la urna, lo cual permite abrir o cerrar ésta sin que el fiel se mueva.

Fiel. — Dos montantes de fundición A y A (fig. 61, 62) dispuestos simóticamente, terminan respectivamente en un brazo oblicuo que forma una V doble invertida; estos dos brazos se reunen en forma de ángulo para sostener un plano de ágata *q* en quo descansa

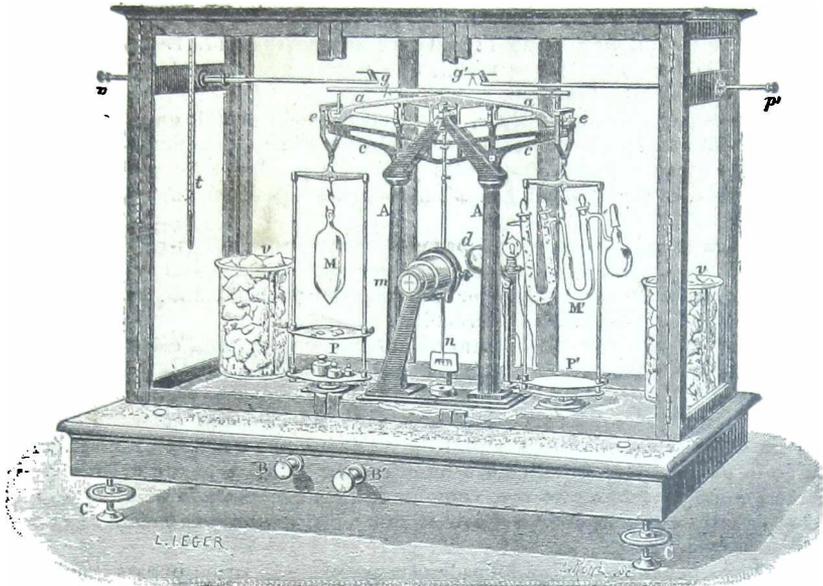


Fig. 61.

el cuchillo central del fiel *aa*. Este fiel consiste en una regla plana de bronce, de figura de rombo prolongado. Para disminuir su peso se le vacía, no dejando subsistir más que los lados del rombo. De esta manera, se obtiene un fiel ligero, quo opone gran resistencia a la flexión, cuanto quo es corto respecto de los usados en las antiguas balanzas de precisión. Su eje de suspensión se obtiene de manera muy precisa por medio de un

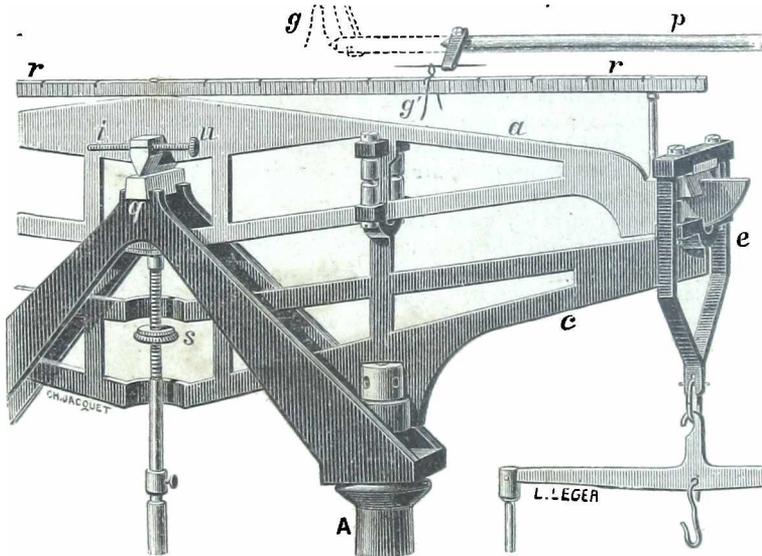


Fig. 62.

prisma triangular de acero templado o mejor de ágata, quo se engarza perpendicularmente en su centro, y cuya arista inferior, perfectamente rectilínea, descansa sobre el plano de ágata del montante.

En cada extremidad del fiel se encuentra fijo un prisma semejante al precedente, pero con la arista hacia arriba; esta arista está destinada á sostener un plano de ágata ongarzado en la parte superior de un estribo *e* que termina el sistema de suspensión de cada platillo.

Horquilla. — Si estos prismas permanecieran en contacto con los planos de ágata, sus aristas se mellarian, perdiendo la balanza en sensibilidad. Evitase este inconveniente gracias a la horquilla, pieza móvil, que permite levantar los platillos y el fiel cada vez que la balanza no funciona.

Consiste en una pieza de fundición *c*, *c'*, tan larga como el fiel, que se levanta o baja rozando suavemente entre los dobles brazos oblicuos del soporte central, por medio de dos varillas que atraviesan los montantes y que se pueden manejar desde fuera. El botón *B* sirve para levantar el fiel y el *B'*, mediante mecanismo análogo, para alzar los platillos.

Jinetes. — Para evitar el empleo de pesas demasiado pequeñas se las sustituye por pequeños jinetes o caballitos *g*, *g'*, formados por un hilo de platino que pesa exactamente un centígramo. Se los desliza por una regla metálica plana, sujeta al fiel, colocada encima de éste y paralela a su dirección.

A ambos lados de la vertical del punto de suspensión, se halla dividida esta regla en diez partes iguales, señaladas con pequeños trazos, el primero de los cuales se encuentra on la vertical del punto de suspensión y los últimos en las dos verticales simétricas de los puntos de unión de la balanza. Evidentemente, un caballito colocado en el último trazo, obrará como si estuviera en el platillo y pesará allí un centígramo; pero, según la teoría de la palanca (33), si se coloca en el primer trazo, a partir del eje de suspensión, actuará como 1/10 de *cg.*, o sea, como un milígramo colocado en el platillo: en una palabra, el caballito que se mueve sobre el fiel *obra proporcionalmente a su distancia del eje de suspensión.*

Estos caballitos pueden manejarse desde el exterior de la urna; puesto que las varillas laterales *pg* y *p' g'*, permiten cogerlos por su anilla superior.

Límite de precisión de la balanza. — Las balanzas de precisión que son sensibles hasta un milígramo, con una carga total de un kilogramo, son aparatos de construcción corriente; pero las hay que pueden apreciar una *millonésima* de gramo.

Deleuil construyó para Regnault una balanza cuya sensibilidad llegaba a una *diezmillonésima*.

En la Oficina internacional de pesas y medidas se ha acusado aún mayor sensibilidad. He aquí algunos datos relativos a estas pesadas de alta precisión. Nos han sido proporcionados por la amabilidad de M. R. Benoît, director de dicha oficina, cuyas ciencia y gran experiencia son autoridad en la materia.

Ante todo, la sensibilidad de la balanza no es la única condición necesaria. Además, tal sensibilidad es fácil de obtener, pues basta elevar el centro de gravedad del fiel. Hay otra cualidad, algo más difícil de conseguir, la *constancia*, es decir, la fidelidad con que el fiel recobra rigurosamente la misma posición para las mismas cargas, cuando se maneja varias veces. Esta cualidad varía en razón inversa de la sensibilidad; por eso, se debe, por medio de tanteos, obtener entre estas cualidades contrarias la compensación más favorable al resultado final.

La precisión de los resultados depende también de las condiciones exteriores a la balanza. Se obtiene el máximo de precisión cuando se compara el peso de dos cuerpos de la misma sustancia, porque, entonces, la aglomeración de aire es igual en los dos cuerpos (181). Cuando no sucede así, lo que limita la precisión de los resultados es el conocimiento imperfecto de las densidades y, por consiguiente, de los volúmenes.

Las pesadas más precisas se han obtenido en la Oficina internacional, en comparaciones entre dos kilogramos de la misma sustancia, y, por tanto, de igual volumen. Entonces, se puede garantizar, casi seguramente, el valor relativo, con una aproximación de $\pm 0,01$ mg., lo que equivale a una precisión de una cienmillonésima. Pero semejante comparación requiere tantas precauciones que exige de 5 a 6 horas de observación.

Aun se obtiene mayor precisión si se opera sobre un cierto número de piezas que se comparan entre sí en varias combinaciones. Uno de los trabajos de pesadas más considerables y probablemente el más perfecto que se ha hecho, ha sido el efectuado por la Oficina internacional para determinar los nuevos prototipos del kilogramo, en platino iridiado.

Este trabajo, que ha durado varios años, fué ejecutado con unas cuarenta piezas. Discutiendo sus resultados. M. Thiesen ha llegado, para *el error probable* de una pesada, a números siempre próximos a $\pm 0,007$ mg., y, para el error probable del valor de un kilogramo, a cifras comprendidas entre $\mp 0,002$ y $\pm 0,003$ mg.

El error absoluto cometido en una pesada disminuye en las piezas menores, en primer

lugar, porque en ese caso se efectúan las pesadas por medio de balanzas más delicadas, y, después, porque algunas causas de error pierden su importancia. He aquí, como ejemplo, varios resultados obtenidos por M. Benoit en la rectificación de una serie de pesos divisionarios. El peso de 5 gr. valía $5,0002392 \pm 0,0013$ mg.; luego el error absoluto apenas era superior a una milésima de miligramo. En los pesos más pequeños el error era aun menor. Así, el peso de 2 mg. valía $2,2631$ mg. $\pm 0,0006$ y el de 1 mg., $0,9726 \pm 0,0006$.

53. **Balanzas de precisión con amortizador.** — El defecto general de las balanzas sensibles es no fijarse en su posición de equilibrio sino después de una larga serie de oscilaciones, lo cual hace las pesadas muy lentas*. Se ha tratado de suprimir este inconveniente en las balanzas *aperiódicas*, en que las oscilaciones se han amortizado.

Amortizador de P. Curie. — Uno de los primeros que han mandado construir balanzas con *amortizadores de aire* fué P. Curie. Estos amortizadores consisten en dos campanas metálicas suspendidas debajo de los platillos, y móviles en campanas fijas de diámetro un poco mayor. La amortización se produce por la considerable resistencia que opone el aire en tales condiciones.

Amortizador de Collot. — Se puede obtener la amortización por un mecanismo mucho más sencillo, por ejemplo, con el amortizador de aceite de M. A. Collot. Este sistema consiste en una pequeña paleta (fig. 63) que termina la aguja *ab* y que se sumerge en un recipiente *V* que contiene aceite de vaselina. De este modo, en virtud de la resistencia que el aceite opone al movimiento de la paleta, se obtiene una amortización muy rápida, sin que disminuya la sensibilidad de la balanza, que está limitada a 1 mg. Las balanzas que tienen un amortizador de aceite no se pueden emplear en las pesadas de alta precisión; se usan solamente en los trabajos corrientes de laboratorio.

Para poder efectuar con mayor rapidez todavía las pesadas, M. Collot añade a la aguja de sus balanzas con amortizador, una pequeña esfera *c* transparente, que posee una división que se ilumina por detrás y se la ve mediante un ocular. En el campo de este ocular, una vez que la aguja está fija, se ve un trazo fijo que coincide con una de las divisiones del cuadrante. Si la balanza está bien regulada, el número de esta división indica los miligramos del cuerpo añadido, y el peso restante lo dan las pesas del platillo.

54. **Balanza de Roberval.** — Esta balanza que, por su comodidad, se usa mucho para pesadas corrientes, se compone de un paralelógramo *ABA'B'* (fig. 64), formado por 4 barras rígidas, articuladas en *A*, *A'*, *B* y *B'*. Las palancas *AB* y *A'B'* son móviles

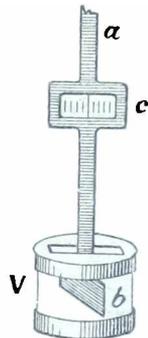


Fig. 63.

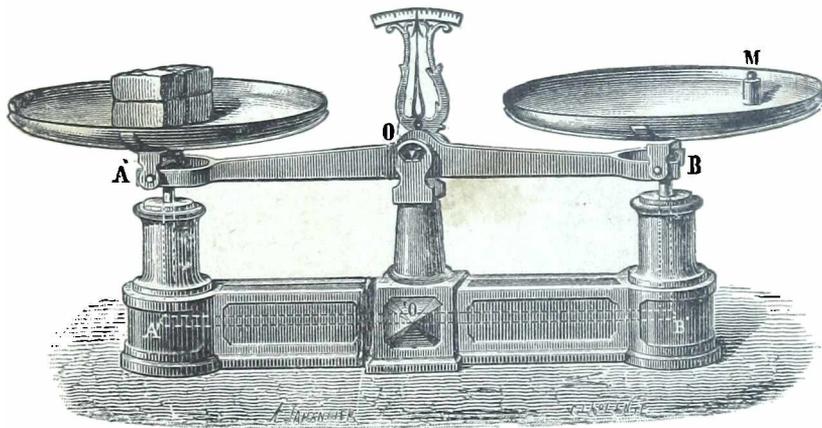


Fig. 64.

alrededor de dos ejes fijos *O*, *O'* horizontales y colocados en su centro. Este modo de unión obliga a las barras *AA'* y *BB'* a permanecer verticales. Los platillos perpendiculares que éstas soportan permanecen, pues, horizontales en su movimiento. Además:

* La balanza de Collot carece de este defecto, merced a su construcción especial.

puede demostrarse que la posición de los cuerpos en los platillos no influye en el equilibrio de la balanza*.

55. *Romana*. — La *balanza romana*, o simplemente *romana*, es una balanza poco sensible, pero de cómodo empleo. Compónese de una palanca de hierro.

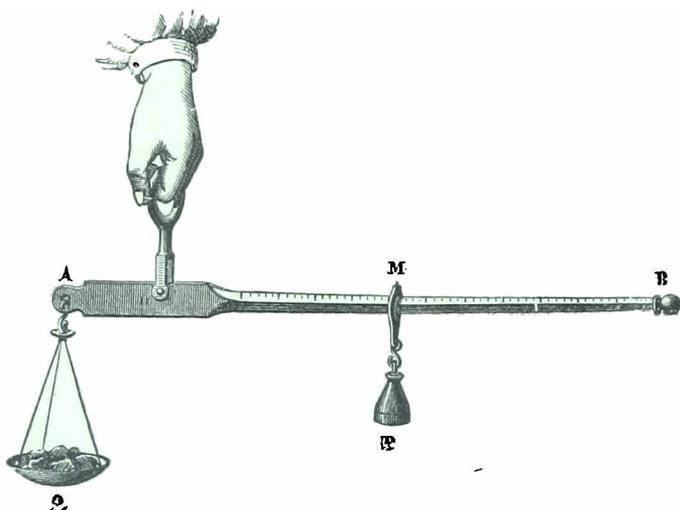


Fig. 65.

de primor género. AB (fig. 65) cuyo punto fijo reside en O. Uno de los brazos OA, de longitud constante, tiene en su extremo A un platillo o un gancho, destinado al cuerpo por pesar; por el otro brazo, que es de longitud variable y está provisto de divisiones equidistantes, se puede hacer deslizar, mediante una anilla corrediza M, un peso constante P; se lo mueve hasta que haga equilibrar al peso desconocido; el fiel queda horizontal.

Este aparato está graduado por comparación,

partiendo del equilibrio inicial en que, sin peso en el platillo y sin el peso corredizo, MP, el fiel permanece horizontal: sucesivamente, se han ido colocando en el platillo pesas de 1, 2, 3 kilogramos, y se han marcado 1, 2, 3 kg. en los puntos adonde se lleva el peso corredizo para realizar el equilibrio horizontal; después, se han dividido los intervalos sucesivos en diez partes iguales, que aprecian décimas de kilogramo.

56. **Definición estática de la masa de un cuerpo.** — **Gramo.** — El *peso* de un cuerpo, es decir, la resultante de las acciones de la gravedad sobre este cuerpo, *varía según el lugar en que se encuentre***. — Este es un hecho que se deduce de la medida directa de la *intensidad de la gravedad* en los diversos lugares (411). Este fenómeno se podría demostrar si se dispusiera de un dinamómetro muy sensible que no sufriese ninguna variación con el tiempo: el mismo peso suspendido del aparato, haría que el resorte se doblase tanto menos cuanto más cerca se hallara del ecuador.

La balanza *no indica esta variación de peso*. Cuando este aparato de comparación demuestra, en un lugar, que los pesos de dos cuerpos son iguales, da el mismo resultado en cualquier otro lugar. Esto prueba que, a pesar de su propia variación, los pesos de dos cuerpos, iguales en un lugar dado, serán también iguales en todo otro lugar. Esto consiste en que la acción de la gravedad — como la de cualquiera otra fuerza — en el cuerpo depende de un coeficiente mecánico, que es característico de cada cuerpo e invariable: puesto que se halla en relación con la *cantidad de materia* del cuerpo (principio de la conservación de la materia): dicho coeficiente se denomina *masa*.

* Véase G. MANEVRIER: *Tratado elemental de mecánica racional y aplicada*.

** Así: 997 cm³ de agua pesan, en París, tanto como 1 000 cm³ de agua, en el Ecuador.

De esta definición, resulta, evidentemente, que dos cuerpos de la misma masa tendrán, en todas partes, el mismo peso, y que, recíprocamente, de esta igualdad permanente de los pesos de dos cuerpos, puede deducirse la igualdad de sus dos masas.

Por consiguiente, la balanza, que es un aparato de comparación para las masas como para los pesos, puede servir también de instrumento de medición para las masas: puesto que esta última magnitud es constante, en todos lugares, en cada cuerpo, y que se puede escoger una unidad de masa *invariable*.

Así se ha hecho en el sistema C. G. S. : se ha establecido como unidad de masa la milésima parte de la masa de un bloque de platino conservado como tipo en los Archivos nacionales de París.

A esta unidad se ha dado el nombre de *gramo* que antes designaba la unidad de peso en el sistema métrico*.

De lo cual se infiere que la masa del tal bloque de 1 000 gramos es el *kilogramo tipo*.

Al construir el kilogramo tipo, se tendía a darle la masa de 1 dm³, de agua a la temperatura de su máximo de densidad (4° centígrados), de modo que 1 gramo hubiera sido la masa de 1 cm³ de agua a 4°. Pero, por causa de errores inevitables, el kilogramo tipo no tiene exactamente la masa de 1 dm³ de agua a 4°. Las medidas más precisas, hechas estos últimos años, asignan al decímetro cúbico de agua, en su máximo de densidad, la masa 999,972 gramos C. G. S., y por tanto, al centímetro cúbico de agua a 4°, la masa de 0,999972 gramos.

De todos modos, tratándose de medidas que no exijan una precisión extremada, puede admitirse que *la masa de 1 cm³ de agua a 4° es 1 gramo*.

OBSERVACIÓN. — Así como para el metro tipo (8) se podría dudar de la invariabilidad absoluta de la masa del kilogramo tipo, a causa del rozamiento que sufre en las manipulaciones y limpieza, Los señores Macé de Lépinay, Benoit y Buisson emplean el método siguiente, para poder encontrar, en cualquier momento, el kilogramo tipo tal como es ahora :

Se pesa en el aire y en el agua a 4° un cubo de cuarzo, y así se deduce la masa de agua que desaloja (146) en función del valor del kilogramo actual. Por otra parte se miden sus dimensiones en función de la longitud de onda de la raya verde de cadmio : de donde se deduce su volumen, en función del cubo que tenga por arista esta longitud de onda. Luego se sabe el valor en gramos actuales de la masa de agua a 4° que tenga el volumen de un cubo. Esto permite reconstituir, en toda época y en cualquier lugar, el kilogramo con su valor actual.

Análogos trabajos han emprendido MM. Chapuis y Guillaume, trabajos que han dado resultados de completo acuerdo con los anteriores.

57. Relación entre el peso y la masa de un cuerpo. — Intensidad de la gravedad. — La balanza sirve también para comparar entre sí los pesos de los cuerpos y para medir sus masas en gramos. En cuanto a los pesos, se miden por *unidades de fuerza*. Como unidades de fuerza, se han adoptado sucesivamente el *gramo-peso* y la *dina*.

* Convendría llamarla *gramo-masa*, o de otra manera, reservando el nombre de *gramo* para el peso de la unidad de masa.

La *dina* es la unidad de fuerza del sistema C. G. S. (78). Más adelante, la definiremos.

El *gramo-peso* es el peso de 1 gramo-masa, en París.

Intensidad de la gravedad. — Se da el nombre de *intensidad de la gravedad en un lugar* dado al peso de la unidad de masa en este lugar.

Este nombre depende evidentemente del sistema de unidades escogido.

En el sistema C. G. S., la intensidad de la gravedad, en París, es 981 (exactamente, 980,99) dinas. En el ecuador sólo llega a 978 dinas.

Sea, en general, m la masa de un cuerpo; p , su peso, y g , la intensidad de la gravedad; cada unidad de masa del cuerpo tiene un peso g , luego la masa total tiene el peso mg , según la regla de composición de las fuerzas paralelas (como lo son, en un lugar dado, las fuerzas de la gravedad aplicadas a cada unidad de una masa m). Por consiguiente

$$p = mg$$

Esta fórmula dará el peso p en dinas, si m se expresa en gramos, y g en unidades C. G. S.

DENSIDADES Y PESOS ESPECÍFICOS

58. Densidad de un cuerpo. — Masa específica. — Volumen específico. — Peso específico. — Si se pesan volúmenes iguales de diversas sustancias, se verá que sus masas son diferentes. De este hecho se deduce un coeficiente característico de los cuerpos, que es su *densidad absoluta* o *masa específica*. Así se llama la masa de 1 centímetro cúbico del cuerpo.

Por ejemplo, 1 centímetro cúbico de hierro pesa 7,8 gramos; luego se dice que la densidad absoluta del hierro es 7,8. La del agua es 1, porque 1 centímetro cúbico de agua pesa 1 gramo*.

Relación entre la masa de un cuerpo, su volumen y su densidad. — Si designamos por m la masa de un cuerpo; por v , su volumen, y por d , su densidad, tendremos, según la definición de densidad :

$$m = vd.$$

Densidad con relación al agua. — Se llama densidad de un cuerpo con relación al agua la relación de las masas de volúmenes iguales del cuerpo y del agua, tomada ésta a la temperatura de 4 centígrados.

Si representamos por m y m' estas masas, la densidad relativa del cuerpo con relación al agua es, por definición :

$$d' = \frac{m}{m'}.$$

OBSERVACIÓN. — Si se considera que el gramo es la masa de 1 cm³ de agua a 4°, la densidad relativa de un cuerpo está representada por el mismo número que su densidad absoluta.

* Exactamente, es 0,99997 (56).

En efecto, sea v el volumen común del cuerpo y del agua. Como la densidad del agua es igual a 1, tendremos $m' = v$; de donde :

$$d' = \frac{m}{m'} = \frac{m}{v} \text{ es decir } d' = d^*.$$

Más adelante (143) estudiaremos los procedimientos empleados para medir las densidades de los diversos cuerpos.

Volumen específico. — Se llama *volumen específico* de un cuerpo, *el volumen de la unidad de masa* de este cuerpo.

En el sistema C. G. S., el número que mide el volumen de 1 gramo del cuerpo es el número de centímetros cúbicos.

Es evidente que el volumen específico de un cuerpo es igual al inverso de su masa específica y reciprocamente.

Peso específico. — Se denomina *peso específico* de un cuerpo, *el peso de la unidad de volumen* de dicho cuerpo.

El peso específico ϖ de un cuerpo está necesariamente relacionado con su masa específica d por la igualdad general

$$p = mg,$$

que, en este caso, se transforma en

$$\varpi = dg.$$

Así, en Paris, $\varpi = 981.d$ representa, en dinas, el peso de 1 cm³ del cuerpo.

CAPÍTULO V

MOVIMIENTOS. — CINEMÁTICA

59. Definiciones. — Se dice que un cuerpo está en *movimiento* con relación a los objetos que le rodean, cuando las distancias del cuerpo a esos objetos varían con el tiempo.

El estudio de los movimientos se llama *cinemática*.

El cuerpo en movimiento se denomina *móvil*.

Al lugar geométrico de los puntos que el móvil ocupa sucesivamente en el espacio, se da el nombre de *trayectoria*.

Si el móvil es un punto geométrico, su trayectoria es una línea. Según que esta línea sea recta o curva, se dice que el movimiento es *rectilíneo* o *curvilíneo*.

* En rigor, se tiene

$$m' = v \times 0,99997,$$

de donde :

$$d' = \frac{m}{v \times 0,99997} = \frac{d}{0,99997}; \text{ y } d = d' \times 0,99997.$$

Unidad de tiempo. — Segundo. — Para estudiar los movimientos, hay que saber medir los intervalos de tiempo. Más adelante (116), veremos cómo se efectúa esta medida.

La unidad empleada es el *segundo de tiempo medio*, que se define según las leyes del movimiento de la Tierra alrededor del Sol. Un *día solar medio* comprende $24 \times 60 \times 60 = 86\ 400$ segundos: el *segundo, unidad de tiempo C. G. S. es la ochenta y seis mil cuatro centésima parte del día solar medio*.

60. Movimiento uniforme. — Velocidad. — Unidad de velocidad. — Se llama *movimiento uniforme* aquel en que el móvil recorre *espacios iguales en tiempos iguales*, por pequeños que sean estos tiempos. El movimiento uniforme puede ser *rectilíneo* y *curvilíneo*.

Velocidad. — Se ha convenido en medir la velocidad del movimiento uniforme por *el espacio recorrido en un segundo*.

Si e es el espacio recorrido en t segundos, la velocidad v se obtiene, indudablemente, del cociente $v = \frac{e}{t}$. De donde, $e = vt$.

Unidad de velocidad. — Unidad C. G. S. — La relación $v = \frac{e}{t}$ determina la unidad de velocidad. Se ve, en efecto, que si $e = 1$ y $t = 1$, v será también igual a la unidad; es decir, que *la unidad de velocidad es la velocidad de un móvil animado de movimiento uniforme, que recorre un centímetro en un segundo*.

En el sistema métrico, se evalúa la velocidad en *metros por segundo*.

61. Movimiento variado rectilíneo. — El *movimiento variado* es aquel en que un móvil recorre, en tiempos iguales, espacios desiguales.

Sea OX (fig. 66) la trayectoria de ese movimiento. Midamos el espacio recorrido desde el punto O de la trayectoria, en la cual hemos tomado OX como sentido positivo. Sea M la posición del móvil en un tiempo t , contado desde un instante cualquiera, tomado como *origen del tiempo*, o *tiempo cero*. El espacio recorrido e varía con el tiempo t . Se tiene pues

$$e = f(t). \quad [1]$$

Esta relación, que difiere según el movimiento considerado, se llama *ecuación de los espacios*.

Velocidad media durante un intervalo de tiempo dado (Movimiento rectilíneo). — Sea M la posición del móvil en el tiempo t y M', en el $t + \Delta t$. (Designaremos, según costumbre algebraica, por Δe el aumento MM' del espacio y por Δt el del tiempo). Es evidente que se podría llevar al móvil desde la primera posición a la segunda, en el mismo tiempo Δt , imprimiéndole un movimiento rectilíneo *uniforme*. La velocidad V_m de este movimiento virtual estaría dada por la ecuación

$$V_m = \frac{\Delta e}{\Delta t},$$

V_m es lo que se llama la *velocidad media* del movimiento variado, durante el intervalo de tiempo Δt que sucede al instante t .

Velocidad en un instante t cualquiera (Movimiento rectilíneo). — Si se supone que el intervalo de tiempo Δt disminuye indefinidamente y tiende hacia cero, el aumento de

espacio MM' tiendo simultáneamente a cero; pero el cociente $\frac{\Delta e}{\Delta t}$, esto es, la velocidad media, tiendo generalmente hacia un límite determinado; el valor de este límite es lo que se llama *velocidad del movimiento variado en el momento t*. Se tiene pues,

$$Vt = \lim. \left(\frac{\Delta e}{\Delta t} \right).$$

Se ve que la velocidad es la derivada del espacio con relación al tiempo. Luego

$$v = \frac{de}{dt} \quad \text{o} \quad v = f(t). \quad [2]$$

Esta relación se llama *ecuación de las velocidades*. Las igualdades [1] y [2] son las *ecuaciones del movimiento*.

62. Movimiento rectilíneo uniformemente variado. — Aceleración. — Unidad de aceleración. — Supongamos un movimiento cuya ecuación de los espacios sea

$$e = a + bt + ct^2$$

Según lo que acabamos de decir, la velocidad en el tiempo t es :

$$v = b + 2ct.$$

Se ve, pues, que la velocidad v varía cantidades *iguales* en tiempos *iguales*. Semejante movimiento se llama *movimiento uniformemente variado*.

Se dice que el movimiento es *uniformemente acelerado*, cuando la velocidad *aumenta* con el tiempo ($c > 0$). Si la velocidad *decrece* cuando crece el tiempo, se le llama *uniformemente retardado* ($c < 0$).

Aceleración. — Se da el nombre de *aceleración* a la cantidad γ , cuya velocidad *crece* o *decrece* durante un segundo. Según la ecuación de las velocidades, tendremos $\gamma = 2c$.

Leyes. — Tomemos como origen del tiempo un momento en que la velocidad sea nula, y tendremos, evidentemente, $b = 0$. Tomemos, además, por origen de los espacios, el punto en que se halla el móvil en el origen del tiempo; y, puesto que e debe ser nula, cuando $t = 0$ resultará, forzosamente, $a = 0$.

Las ecuaciones de este movimiento son :

$$e = ct^2 \quad \text{y} \quad v = 2ct;$$

o bien, según la definición de la aceleración γ .

$$e = \frac{1}{2}\gamma t^2 \quad \text{y} \quad v = \gamma t.$$

De estas fórmulas, se deducen las siguientes leyes :

1ª *Los espacios recorridos son proporcionales a los cuadrados de los tiempos empleados en recorrerlos.*

2ª *Las velocidades adquiridas aumentan proporcionalmente a los tiempos empleados en adquirirlas.*

Unidad de aceleración. — Se ve también que $\gamma = \frac{v}{t}$.

Por consiguiente : *en el movimiento uniformemente variado, la aceleración se obtiene dividiendo el aumento de velocidad, en un tiempo determinado, por este tiempo.*

Y, si, en la fórmula precedente, hacemos $v=1$ y $t=1$, resultará $\gamma = 1$; lo cual demuestra que la *unidad de aceleración es la aceleración de un movimiento uniformemente variado, en que la velocidad crece una unidad por segundo.*

63. **Aceleración de un movimiento variado rectilíneo cualquiera.** — Supongamos un movimiento variado rectilíneo *cualquiera* cuya ecuación de los espacios sea :

$$e = f(t)$$

y la ecuación de velocidad

$$v = \frac{de}{dt} = f'(t).$$

En este movimiento, la velocidad *ya no* varía cantidades iguales en tiempos iguales. Sea Δv el aumento de velocidad, durante el intervalo de tiempo Δt que sucede al momento t .

El cociente $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ se llama *aceleración media* durante el periodo de tiempo Δt . Y se denomina *aceleración del momento t* , al límite γ de esta relación, cuando Δt tiende a cero : es la derivada de la velocidad con relación al tiempo :

$$\gamma = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2e}{dt^2} = f''(t).$$

La aceleración en el momento t es, pues, la segunda derivada del espacio, con relación al tiempo.

64. **Movimiento curvilíneo.** — *Velocidad media.* — Sea un móvil recorriendo la curva S (fig. 67). Si M es su posición en el tiempo t y M' en el tiempo t' (igual a $t + \Delta t$), se concibe que se pueda llevar el móvil de M a M' con un movimiento uniforme y rectilíneo, siguiendo la cuerda MM' : le velocidad V_m de ese movimiento virtual sería :

$$V_m = \frac{\text{cuerda } MM'}{\Delta t},$$

eso es lo que se llama la *velocidad media* del movimiento curvilíneo durante el intervalo de tiempo Δt que sigue al instante t , la cual puede ser representada en magnitud y direc-

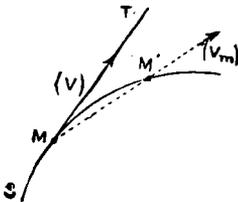


Fig. 67.

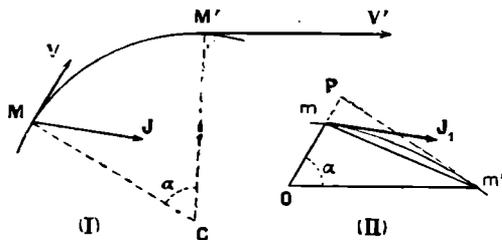


Fig. 68.

ción por un *vector* (V_m) que arranque del punto M y siga la cuerda MM' en el sentido del movimiento real.

Velocidad en un instante dado. — Si se hace ir hacia cero el intervalo de tiempo Δt , el punto M' se acerca al punto M y la cuerda MM' va hacia cero; la proporción de MM' á Δt , va igualmente hacia un límite V que se llama *velocidad en el instante t* del movimiento curvilíneo.

$$V = \lim. V_m = \lim. \left(\frac{\text{cuerda } MM'}{\Delta t} \right),$$

Pero tenemos.

$$\frac{\text{cuerda } MM'}{\Delta t} = \frac{\text{cuerda } MM'}{\text{arc } MM'} \times \frac{\text{arc } MM'}{\Delta t}.$$

En el límite, cuando cuerda MM' tiende hacia cero, sabemos que $\frac{\text{cuerda } MM'}{\text{arc } MM'}$ tiende hacia 1. Luego tenemos

$$V = \lim. \left(\frac{\text{arc } MM'}{\Delta t} \right).$$

Si llamamos e la *abscisa* curvilínea del punto M, es decir el arco de curva comprendido entre un origen cualquiera S, tomado sobre la curva, y el punto M, se tendrá, pues, como para un movimiento rectilíneo,

$$e = f(t), \quad V = \frac{de}{dt} = f'(t).$$

V se ha dirigido siguiendo la tangente M a la curva, porque esta dirección es el límite de la dirección a la cuerda MM'. Luego esta velocidad puede ser representada en magnitud y dirección por un vector (V) que salga del punto M y se dirija siguiendo la tangente MT en el sentido del movimiento.

Aceleración. — Odógrafo. — Sean M y M' las posiciones del móvil en su trayectoria (fig. 68) en los instantes t y $t' = t + \Delta t$, y sean V y V' las velocidades en estos dos instantes. Por un punto O del espacio tracemos dos vectores Om, Om', respectivamente iguales a los vectores. V, V'. Mientras que el punto M describe su trayectoria de M a M', el punto m describe otra curva de m a m' . Esta curva se llama *odógrafo* del movimiento. La velocidad del movimiento de m es cierto vector mJ , que mide la aceleración del móvil real en el punto M; por consiguiente se representará la aceleración en M por el vector MJ, igual y paralelo a mJ .

Cuando el movimiento curvilíneo se vuelve rectilíneo, esta última definición se reduce a la que hemos dado antes.

65. Movimiento circular uniforme. — Es el movimiento de un punto M (fig. 69) que describe una circunferencia, recorriendo *arcos iguales en tiempos iguales*, por pequeños que sean estos tiempos.

Velocidad angular. — Se llama *velocidad angular* en este movimiento el ángulo ω , expresado en *radios*, que describe el radio vector OM del punto móvil; durante la unidad de tiempo. Es el arco descrito, en un segundo, por un punto m que sigue una circunferencia que tiene por radio la unidad de longitud y que está sujeto a quedar en el mismo radio vector que el punto M.

Las velocidades del punto M y del punto m están en la misma relación que OM (= R) y Om (= 1). Tenemos, pues, llamando v la velocidad de M,

$$\frac{v}{\omega} = \frac{R}{1}, \quad \text{de donde} \quad v = \omega R.$$

Periodo. — Se llama *periodo* del movimiento circular uniforme, el tiempo T que emplea el móvil en dar una vuelta completa, es decir, el tiempo que tarda el radio vector en describir el ángulo 2π . Luego.

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad \text{de donde} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

OBSERVACIÓN. — Si el movimiento circular no es uniforme, se toma como definición de la *velocidad angular* en un momento dado, la derivada $\frac{d\alpha}{dt}$, con relación al tiempo, del ángulo α descrito por el radio vector a partir de una posición inicial cualquiera.

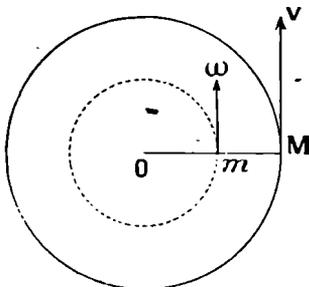


Fig. 69.

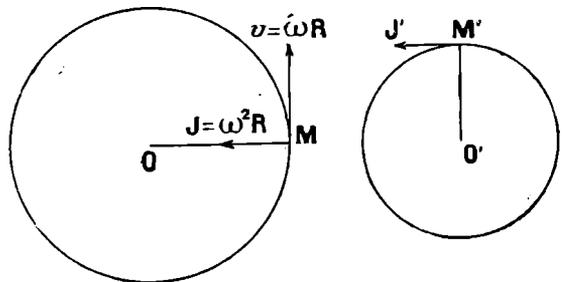


Fig. 70.

Aceleración. — Para tener la aceleración en el punto M hay que trazar la curva odógrafo. Para eso se tira por un punto cualquiera O' (fig. 70) una recta O'M' igual a v, paralela y de igual sentido. Cuando el punto M describe su trayectoria, el punto M' describe evidentemente una circunferencia de radio ωR , con la misma velocidad angular ω . Luego su velocidad M'J' es igual a $\omega \times \omega R = \omega^2 R$. Tal es la magnitud de la aceleración. Por otra parte, en el punto M se dirige según MJ, paralela a M'J' y en

el mismo sentido. Se ve que la aceleración MJ va dirigida del punto M hacia el centro O y que tiene por magnitud $J = \omega^2 R$.

66. **Movimientos de un cuerpo sólido.** — **Movimiento de traslación.** — **Movimiento de rotación.** — *Movimiento de traslación.* — Se dice que un sólido está animado de movimiento de traslación cuando, durante el movimiento, toda recta trazada en el cuerpo es paralela a sí misma. En este caso, el cuerpo se mueve *sin girar* y todos sus puntos describen trayectorias que son rectas o curvas paralelas, de tal manera que las velocidades de todos los puntos son, en cualquier momento, iguales.

Un movimiento de traslación es *rectilíneo* cuando las trayectorias de todos los puntos son rectas, y *curvilíneo*, cuando son curvas. Puede ser uniforme ó variado, lo mismo que el movimiento de un solo punto, al cual se reduce inmediatamente.

Movimiento de rotación. — Es el movimiento de un cuerpo que gira alrededor de un eje fijo. En este caso se hallan la mayor parte de las piezas de las máquinas. En tal movimiento, cada punto del cuerpo describe una circunferencia cuyo centro está en el eje y cuyo plano es perpendicular a este eje. Si el movimiento de rotación es uniforme, el movimiento de todo punto es un movimiento circular uniforme. La velocidad angular es la misma para todos los puntos.

Movimiento helicoidal. — Cuando un cuerpo gira alrededor de un eje, moviéndose según este eje de manera que cada uno de sus puntos describa una hélice, el movimiento de que está animado se llama *movimiento helicoidal*. Tal es el movimiento de un tornillo que da vueltas en una tuerca fija (15).

CAPÍTULO VI

DINÁMICA. — CAÍDA DE LOS CUERPOS GRAVITACIÓN UNIVERSAL

67. **Dinámica.** — **Principio de la inercia.** — La dinámica es la parte de la mecánica que trata del estudio de las fuerzas no ya en *estado estático*, es decir, equilibrándose en un sistema material, sino en *estado dinámico*, esto es, produciendo movimiento.

Uno de los principios o postulados en que está fundado este estudio es la proposición conocida con el nombre de *Principio de la inercia*.

Principio de la inercia. — 1º *Un cuerpo no puede modificar por sí mismo su estado de reposo ni su estado de movimiento.*

2º *Si un cuerpo libre no se halla solicitado por ninguna fuerza, este cuerpo se encuentra en reposo o bien está animado de un movimiento de traslación rectilíneo y uniforme.*

La primera proposición es la única manera general de enunciar el principio de la inercia. Sin embargo, hablando con propiedad, no constituye un principio, pues se reduce a expresar en forma nueva la existencia de esta propiedad esencial de la materia, que hemos definido por el nombre de *inercia*. Por el contrario, la segunda parte es un verdadero postulado. Nada podía hacer adivinar *a priori* que el *movimiento natural* de los cuerpos es el rectilíneo y uniforme; hasta se creyó, mucho tiempo, que era el circular y uniforme. Pero el simple hecho de una bola lanzada sobre un piso horizontal perfectamente llano,

que se mueve de modo visible en línea recta con velocidad, no constante sino decreciente poco a poco (por causa del frotamiento), ha bastado para indicar este principio; después, se le ha generalizado.

Objeto de la dinámica. — El objeto principal de la dinámica es determinar el movimiento que adquiere un cuerpo, cuando se conocen las fuerzas que actúan sobre él.

En primer lugar, estudiaremos el movimiento producido por una fuerza constante en dirección y magnitud, que obre sobre un cuerpo.

68. **Caída de los cuerpos.** — **Estudio experimental.** — Cuando un cuerpo deja de estar sostenido, cae por la acción de su propio peso*. Tan pronto como comienza la caída, el aire opone fuerzas resistentes; pero éstas son despreciables para un cuerpo pesado de poca superficie y que no haya adquirido gran velocidad.

1° *Ley de la dirección de la caída.* — *Por la acción de su peso, todo sólido adquiere un movimiento de traslación rectilíneo y vertical.*

Este fenómeno se demuestra por el siguiente experimento : Se adapta el hilo de una plomada a una estrecha abertura de una placa colocada por cima del suelo. Se hace descender la plomada hasta que se halle en contacto con el suelo, y se señala el punto en que su extremo toca al suelo. Levántase la plomada, sin cambiar su punto de unión, y, cuando se halla bien en equilibrio, se quema el hilo de suspensión. La bala cae, entonces, sin sacudida, y se ve que su extremo toca al suelo en el punto señalado.

OBSERVACIÓN. — *Influencia del movimiento diurno.* — En todos casos, cuando el cuerpo cae de bastante altura, se puede observar una pequeña desviación de la trayectoria. Esto depende del movimiento de la Tierra. Cuando el cuerpo está elevado por cima del suelo, se halla más distante del centro de la Tierra y tiene un movimiento hacia el Este cuya velocidad es mayor que la de los puntos que se hallan debajo de él. Durante la caída, conserva dicha velocidad y cae al Este de la vertical de su punto de partida.

Varios experimentadores han tratado de evidenciar esta desviación de la caída, especialmente, Guglielmi, en Bolonia, en 1792; Bensenberg, en Hamburgo, en 1802; Reich, en 1834, en un pozo de mina, de Freiberg, y finalmente, Flammarion, en 1905, en el Panteón, en París. Estos experimentos han confirmado el resultado de la teoría. Pero la desviación es demasiado débil para prestarse a una medida precisa; se calcula que, en el ecuador, donde es máxima, no alcanza sino a 33 mm., en una caída de 100 metros.

2° *Ley de la caída en el vacío.* — *Todos los cuerpos caen con la misma velocidad en el vacío.*

Quando se dejan caer de poca altura diferentes cuerpos de igual peso, abandonándolos a una, del mismo punto del espacio, se ve que todos chocan con el suelo á la vez. Pero si dichos cuerpos son de densidades muy diferentes, se nota que los menos densos caen más lentamente.

Galileo fué el primero que atribuyó tales desigualdades a la resistencia del aire.

Experimento del tubo de Newton. — Newton tuvo la idea de hacer caer cuerpos desigualmente pesados, en el vacío. Su experimento se repite de la manera siguiente :

Tómase un tubo de vidrio de dos metros de largo próximamente

* En realidad, este peso disminuye por el impulso del aire (180). Y, si este fuese superior al peso, como en el caso de los acróstatos, el cuerpo se elevaría, en vez de caer.

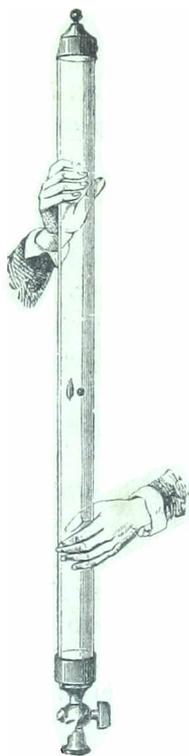


Fig. 71.

(fig. 71), cerrado en una de sus extremidades por una cápsula metálica y terminado en la otra por una tapadera metálica bien adaptada al vidrio con mástic. Esta tapadera se prolonga en forma de un tubo de llave, de cobre, que se puede atornillar en la platina de la máquina neumática. Introdúcense en el tubo antes de cerrarlo una bala de plomo, un fragmento de corcho, un pedazo de papel y algunas barbas de pluma, después de lo cual se hace el vacío. Volviendo entonces bruscamente, de arriba abajo el aparato, se ve que todos los cuerpos colocados en él caen juntos sin que ninguno de ellos se adelante o se retrase respecto de los otros. Pero si se hace penetrar de nuevo en el tubo un poco de aire y se le invierte otra vez, entonces hay un pequeño retraso para los cuerpos más ligeros, retraso que llega a ser considerable cuando se deja entrar el aire por completo.

Experimento del martillo de agua. — Esta resistencia se manifiesta sobre todo en los líquidos, que, en el aire, se dividen cayendo en gotecillas; por el contrario, en el vacío bajan formando una masa, sin dividirse, lo mismo que un cuerpo sólido. Este fenómeno se prueba con el *martillo de agua*. Dase este nombre a un tubo de vidrio algo grueso,

de 30 a 40 centímetros de largo, que se llena de agua en su mitad y que se cierra al fin con la lámpara, después de haber expulsado todo el aire mediante ebullición prolongada (fig. 72). Cuando se invierte bruscamente este tubo, el agua al caer hierde la extremidad inferior con un sonido seco análogo al de un cuerpo sólido que chocara con la pared cristalina.

69. Leyes numéricas de la caída en el vacío. — Naturaleza del movimiento.

— La teoría, confirmada por la práctica, ha conducido á las leyes siguientes de la caída de los cuerpos *en el vacío*, que precisan las fases de este movimiento y determinan su naturaleza :

Ley de los espacios. — Cuando un cuerpo cae libremente en el vacío, los espacios recorridos son proporcionales a los cuadrados de los tiempos empleados en recorrerlos.

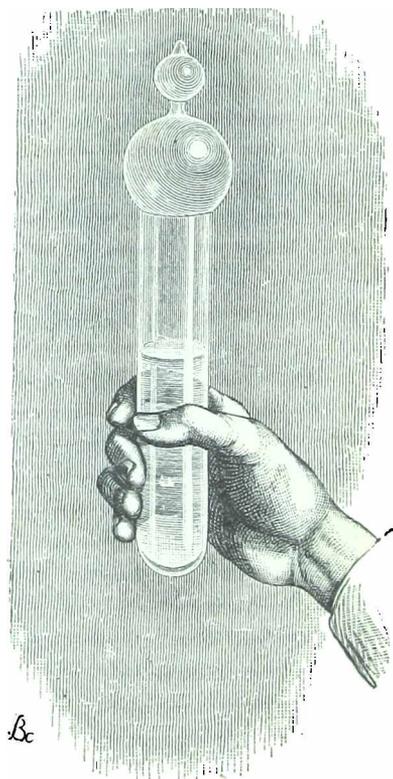


Fig. 72.

Ley de las velocidades. — Las velocidades adquiridas por un cuerpo que cae libremente en el vacío son proporcionales a los tiempos transcurridos desde el principio de la caída.

Esta ley es una consecuencia matemática de la anterior (62). Por lo tanto, no necesita demostración experimental, que, por otra parte, sería difícil ejecutar de manera precisa:

Ley de la naturaleza del movimiento. — Recíprocamente, la ley de los espacios podría deducirse matemáticamente de la ley de las velocidades. Ambas son características del movimiento *uniformemente acelerado* y conducen a este nuevo enunciado que las comprende de modo implícito:

Cuando un cuerpo cae libremente en el vacío, adquiere un movimiento uniformemente acelerado.

70. **Expresión de las leyes de la caída de los cuerpos.** — Llamando g a la aceleración del movimiento de caída de los cuerpos en un lugar dado *, las dos ecuaciones de la caída libre en el vacío, serán:

$$[1] \quad e = \frac{1}{2}gt^2 \quad \text{y} \quad v = gt. \quad [2]$$

Expresión de la velocidad en función del espacio recorrido. — El cuerpo ha recorrido el espacio e al cabo del tiempo $t = \sqrt{\frac{2e}{g}}$ que nos lo da la ecuación [2]. Luego ha adquirido una velocidad

$$v = g\sqrt{\frac{2e}{g}}; \quad \text{o} \quad v = \sqrt{2gc}. \quad [3]$$

71. **Comprobación experimental de las leyes numéricas.** — **Aparato del general Morin.** — La rapidez de la caída hace que ésta pueda observarse con dificultad. Por lo tanto, hay que emplear procedimientos y aparatos especiales para estudiar este fenómeno. Uno de ellos, que es el más exacto y el único directo es el aparato del general Morin.

1º *Principio del aparato.* — Este aparato, cuya idea primitiva se debe a Poncelet, se funda en un principio enteramente distinto de los precedentes. No sirve para moderar la velocidad del móvil que cae, sino que obliga al cuerpo a trazar por sí mismo lo que se denomina un *diagrama* o un *gráfico* de su movimiento, esto es, una curva que permite estudiar geoméricamente todas las particularidades del descenso y determinar sus leyes. Cuanto a la influencia perturbadora del aire, resulta eliminada por la escasa duración del experimento: el móvil no cae sino durante una fracción de segundo y su velocidad no tiene tiempo de llegar a ser bastante grande para que la resistencia del aire pueda retardarla sensiblemente. El aparato de Morin pertenece a la categoría de los registradores (390).

2º *Descripción.* — Una armadura de madera sostiene verticalmente un

* Designamos esta aceleración por la misma letra g que la intensidad de la gravedad (57). En efecto, ya veremos que, en un lugar dado, estas magnitudes están representadas por el mismo número (77).

cilindro de la misma sustancia M (fig. 73), muy ligero y que puede girar libremente sobre dos ejes. Antes de cada experimento se cubre la superficie del cilindro con una hoja de papel pautado en cuadrados ó rectángulos. Se pega esta hoja de manera que una de las direcciones de los lados sea horizontal y, por consiguiente, vertical la otra. Las verticales servirán para medir el espacio recorrido por el cuerpo que cae a lo largo del cilindro, y las horizontales para dividir la duración del descenso en intervalos iguales.

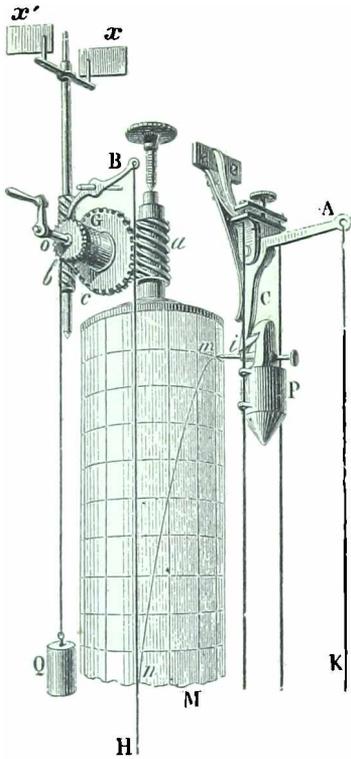


Fig. 73.

El móvil es una masa de fundición P, que lleva un lápiz *i* apretado contra el papel por un pequeño resorte. Esta masa es dirigida en su descenso por dos alambres de hierro muy tensos que pasan por ojetes hechos en ambos lados. La misma masa presenta en su parte superior un diente que se apoya en la extremidad de una palanca acodillada AC. En consecuencia, si se tira de un cordón K atado a la palanca, ésta suelta el diente, y la masa P empieza su caída.

Cuanto a la rotación del cilindro, se obtiene mediante un peso Q suspendido de una cuerda que se arrolla en un torno

G. El eje de éste lleva en un extremo una rueda dentada *c* que impulsa

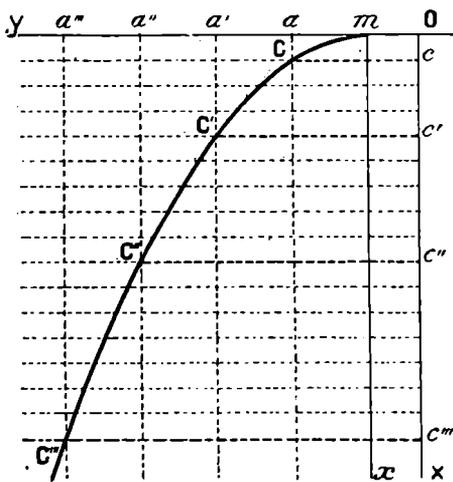


Fig. 74.

dos tornillos sin fin *a* y *b*, el primero de los cuales hace girar el cilindro mientras el otro pone en movimiento dos aspas *x* y *x'*. En la otra extremidad del torno se halla una rueda *o* en cuyos dientes penetra la extremidad de un punzón B, que impide girar al torno y a todo el sistema. Pero tirando de un cordel H atado al punzón se deja en libertad la rueda *o*, el peso Q baja y todo el sistema se pone en movimiento. Éste es primero acelerado, puesto que lo produce el descenso de un cuerpo grave; pero el aire opone a las aspas una resistencia que crece con mucha

mayor rapidez que la velocidad de rotación, de modo que la aceleración impresa por la gravedad acaba anulándose y la rotación se convierte en

uniforme. Este resultado se ha obtenido cuando el peso Q ha recorrido próximamente las tres cuartas partes de su camino. Entonces se tira de la cuerda K , y la masa P cae verticalmente.

3^o *Operación.* — Si el cilindro M fuera fijo, el lápiz trazaría sobre el papel una línea recta que sería una generatriz del cilindro; pero como éste da vueltas con movimiento uniforme, el lápiz traza una curva. Se rasga la hoja de papel según una generatriz, y se la saca de sobre el cilindro. Si, entonces, se desarrolla sobre un plano, se obtiene sensiblemente la curva mC''' (fig. 74); mY es el desarrollo del círculo que el lápiz marcaba antes de comenzar la caída.

Supongamos conocido el punto m en que la curva se separa de su tangente mY , y sean mx , aC , $a'C'$, $a''C''$, $a'''C'''$ generatrices equidistantes. Estas han pasado ante el lápiz a intervalos de tiempo iguales, que designaremos por θ . Las longitudes aC , $a'C'$, $a''C''$, $a'''C'''$, representan respectivamente las longitudes recorridas durante los tiempos θ , 2θ , 3θ , 4θ Luego, la medida de estas longitudes prueba que $a'C' = 4aC$; $a''C'' = 9aC$; $a'''C''' = 16aC$, etc.

OBSERVACIÓN. — Es difícil, si no imposible, ver el punto m en que la curva abandona, a su tangente, es decir, el punto que marcó el lápiz en el momento que el cuerpo empezaba a caer.

Para establecer la ley del movimiento, puede procederse del modo siguiente: Se considera una generatriz cualquiera OX , y se toma, en ella, a partir del punto O , que se encuentra en la recta OY , longitudes Oc , Oc' , Oc'' , Oc''' ... que son, entre sí, como los números 1, 4, 9, 16... Por los puntos c , c' , c'' a c''' se trazan paralelas a OY , que cortan a la curva en los puntos C , C' , C'' , C''' ...; luego, se consideran las generatrices Ca , $C'a'$, $C''a''$, $C'''a'''$... que pasan por estos puntos. Resulta que las longitudes aa' , $a'a''$, $a''a'''$ son iguales; luego el punto m puede obtenerse tomando, en OY , $am = aa'$.

72. **Máquina de Atwood.** — Esta máquina es un aparato conocido hace mucho tiempo, pero menos exacto que la máquina de Morin. Puede servir para estudiar las leyes de la caída de los cuerpos, y permite sustituir el movimiento de caída por un movimiento de igual naturaleza, pero más lento.

1^o *Descripción.* — La máquina (fig. 75, 76) se compone de una polea muy ligera y movable, por cuya garganta pasa una cuerda, que sostiene en sus puntas dos masas iguales K . Este sistema se encuentra en equilibrio en todas las posiciones relativas de las dos masas; pues el peso del hilo es completamente despreciable comparado con los dos pesos iguales P de éstas. Pero supongamos que se eleve una de las masas K hasta el punto más alto que puede alcanzar, y que se ponga encima de ella una masa adicional k , que tenga un peso p .

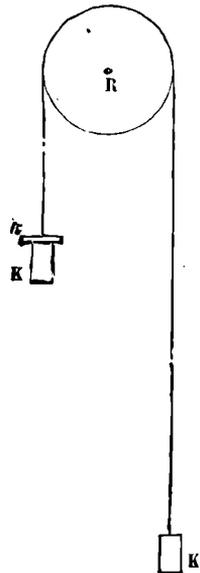


Fig. 75.

El sistema entero será entonces arrastrado por este aumento de carga, y tomará movimiento evidentemente más lento que en el descenso libre.

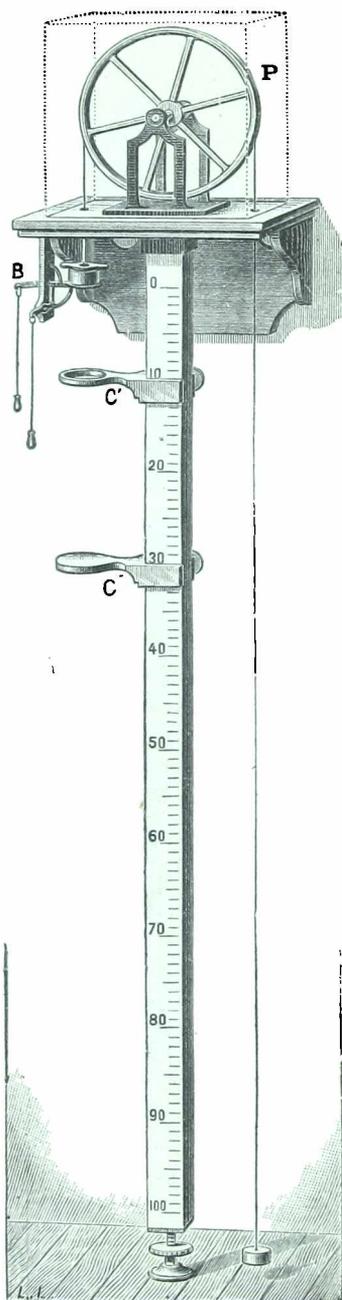


Fig. 76.

El peso K se mueve delante de una regla dividida en centímetros. Por esta escala, se mueve una corredera C (fig. 76) que, por medio de un tornillo de presión, puede fijarse a diversas alturas, y que lleva un disco macizo que sirve para detener el móvil, en un instante cualquiera de su caída *.

El peso, provisto de su masa adicional, se tiene en equilibrio sobre una pequeña plataforma móvil, que se halla situada exactamente en frente del cero de la graduación y que se puede hacer mover en cuanto se desee.

Por otra parte, para medir el tiempo, utilizase un péndulo de reloj o un *metró-nomo* (fig. 77). Este es un pequeño aparato que se emplea en música para marcar el compás, y cuyo órgano esencial es un péndulo que deja oír a intervalos iguales, el sonido que produce su balanceo. El intervalo de dos sonidos puede aumentarse o disminuirse a capricho, subiendo o bajando la pequeña masa M , sobre la reglilla T . Supondremos, por ejemplo, que los intervalos de los sonidos son iguales a un segundo, aunque no es necesario.

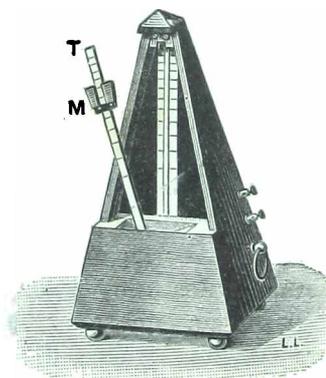


Fig. 77.

2º *Estudio del movimiento.* — Estando la masa en la plataforma, se hace mover a esta, en el momento de una oscilación del péndulo. Se coloca la corredera llena en una posi-

* La figura 76 deja ver también una corredera C' provista de una anilla. Para efectuar el primer experimento que describimos, debe sacarse dicha corredera.

ción cualquiera, y el peso la alcanza antes o después de la oscilación siguiente. Se saca la corredera y se procura colocarla en un punto tal que se oigan, al mismo tiempo, el choque del peso contra la plataforma y la segunda oscilación, lo cual se consigue por tanteo.

De este modo, se determina, en la escala graduada, la altura de caída del peso durante un segundo.

Repítase el experimento procurando colocar la corredera en forma que detenga al peso dos segundos después de su salida. Así, se ve que el espacio recorrido en 2 segundos es *cuatro veces* mayor que el recorrido en 1 segundo.

Asimismo, se halla que, al cabo de 3 y 4 segundos, el espacio recorrido es respectivamente 9 y 16 veces mayor que el recorrido en un segundo. Luego el movimiento de las masas en la máquina de Atwood es uniformemente acelerado.

OBSERVACIONES. — 1ª *Otro procedimiento.* — El espacio recorrido al cabo de 1 segundo es demasiado pequeño para ser determinado con precisión. Es más exacto proceder de modo inverso al precedente. Por ejemplo, se determina primero el espacio recorrido en 3 segundos: luego se verá que el recorrido en 1 segundo es 9 veces menor y que el recorrido en 2 segundos es $\frac{4}{9}$ del recorrido en uno.

2ª *Generalización de los resultados.* — En la máquina de Atwood, el movimiento es lento, porque la fuerza que lo produce, y que es el peso de la masa adicional, obra sobre una gran masa.

Esta masa está, en efecto, constituida por la misma masa adicional, por las dos masas grandes y por la polea.

Si se emplea una masa adicional cada vez mayor, o bien, si, recíprocamente, se reducen cada vez más las masas grandes y la de la polea, se nota que el movimiento permanece uniformemente acelerado, al mismo tiempo que se hace cada vez más rápido.

Por consiguiente, si el peso de la masa adicional actuase sobre esta misma masa, es decir, si el cuerpo cayera con caída libre, se deduce naturalmente que el movimiento sería, también, uniformemente acelerado.

73. **Plano inclinado.** — Para estudiar la caída de los cuerpos, Galileo imaginó sustituir el movimiento rápido, por el movimiento más ó menos lento de un cuerpo abandonado a sí mismo, en un plano inclinado.

Supongamos que un cuerpo G (fig. 38) pueda deslizarse, sin rozamiento, por un plano inclinado AB, y sea α el ángulo de este plano con el horizonte. Ya sabemos que el peso P del cuerpo se descompone en dos fuerzas: una GF', normal, no hace sino apoyar el cuerpo contra el plano, y está equilibrada por una reacción normal ejercida por este plano; la otra, $F = P \text{ seno } \alpha$, hace deslizarse al cuerpo a lo largo de una línea de mayor pendiente, cuando se le abandona a sí mismo. El movimiento que adquiere el cuerpo en tales condiciones es un movimiento uniformemente acelerado.

Plano inclinado de Galileo. — Galileo hizo su plano inclinado practicando en un listón de madera de 7^m,20 de largo próximamente, una ranura o canal bien trazado y muy liso. Bastábale levantar más ó menos una de las extremidades del madero para hacer variar a voluntad la inclinación del plano. El móvil era una bola de bronce duro, muy bien pulimentada; introducíala en la ranura * y observaba, no los espacios recorridos al cabo de 1, 2 segundos, etc., sino cosa equivalente a lo mismo, los tiempos que la bola tardaba en recorrer, primero el canal entero, después $\frac{1}{4}$, después $\frac{1}{9}$, etc., de su longitud. Descubrió que estos tiempos sucesivos variaban como los números 1, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, etc.: esto comprueba la ley de los espacios y demuestra que el movimiento es uniformemente acelerado.

Es de notar que en el mecanismo de este plano inclinado, el cuerpo móvil rueda, en vez de deslizarse como nosotros hemos supuesto. Pero se puede demostrar que no por eso se altera la naturaleza del movimiento.

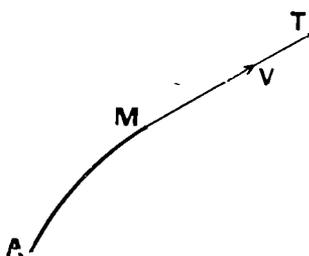
Si se modifica la inclinación del plano inclinado, el movimiento será también uniformemente acelerado; pero es tanto más rápido cuanto mayor es la inclinación.

Por inducción, resulta de aquí que, si el plano fuese vertical, es decir, si el cuerpo cayera con libre caída, el movimiento continuaría siendo uniformemente acelerado.

74. **Movimiento uniforme que sucede a un movimiento variado cuando se suprime la fuerza.** — Supongamos que una fuerza haya comu-

* Cuando el cuerpo móvil rueda en vez de deslizarse como lo hemos supuesto en la teoría, se demuestra que la naturaleza del movimiento no ha cambiado.

nicado a un punto material un movimiento de trayectoria A M (fig. 78) y que en el punto M se suprime la fuerza. En virtud del principio de la inercia, el punto debe conservar la velocidad v que tenía en M, es decir,



continuar su movimiento uniformemente, siguiendo la tangente MT y con la velocidad v . Esto se comprueba por medio de una honda. Cuando se suelta una de las cuerdas, la piedra continúa su movimiento, siguiendo la tangente a la circunferencia que ella describe.

La máquina de Atwood permite demostrar la segunda parte.

Fig. 78.

Para esto utilizamos una corredera anular C' (fig. 76) que da paso a la masa grande; pero que detiene la masa adicional, que, para este experimento, se forma con una larga lámina de latón. Téngase presente que, si llamamos a a la distancia recorrida en un segundo, las ecuaciones del movimiento son :

$$e = at^2 \quad v = 2at.$$

La aceleración es, pues, $2a$, y, al cabo de 1, 2, 3... segundos de descenso, la velocidad se convierte sucesivamente en $2a$, $4a$, $6a$...; mientras que los espacios recorridos son respectivamente a , $4a$, $9a$.

Primero, se coloca la corredera hueca a la distancia a , de modo que detenga a la masa adicional al cabo de un segundo de descenso. Se ve, entonces, que, para que la corredera llena C sea tocada por la masa un segundo después de la detención de la masa adicional, hay que colocarla a la distancia $2a$, debajo de la corredera hueca. También se ve fácilmente que, una vez detenida la masa adicional, el movimiento continúa uniformemente, con la velocidad $2a$.

Si se coloca la corredera hueca a la distancia $4a$, de modo que detenga a la masa adicional al cabo de 2 segundos de descenso, se ve que, para que sea tocada por la masa 1 segundo después de parada la masa adicional, es necesario colocar la corredera llena a la distancia $4a$ de la corredera hueca y que, después, el movimiento continúa uniformemente con la velocidad $4a$; y así sucesivamente.

75. Movimiento que adquiere un cuerpo por la influencia de una fuerza constante en dirección y magnitud. -- En todos los experimentos que preceden, se ha hecho actuar sobre un cuerpo una fuerza constante en magnitud y dirección. En el caso del libre descenso, esta fuerza era el peso del cuerpo, que obraba sobre éste. En el plano inclinado, la fuerza aceleratriz era la componente F (fig. 38) del peso P , la cual, como el mismo peso P , es una fuerza constante en magnitud y dirección. Finalmente, en la máquina de Atwood, la fuerza aceleratriz era el peso de la masa adicional; éste actuaba sobre el conjunto de tal masa, de la polea y de las masas grandes iguales. En todos estos experimentos, el movimiento producido es un movimiento uniformemente acelerado. Luego podemos deducir la comprobación experimental del siguiente enunciado dinámico :

Cuando una fuerza constante en dirección y magnitud actúa sobre un cuerpo, le comunica un movimiento uniformemente acelerado.

Esta comprobación queda también sentada por la exactitud de las consecuencias que de ella se deducen.

76. Proporcionalidad de las fuerzas a las aceleraciones. -- *Las ace-*

laciones $\gamma, \gamma', \gamma'' \dots$ que a un mismo cuerpo comunican sucesivamente las fuerzas $F, F', F'' \dots$, constantes en magnitud y dirección, son proporcionales a las intensidades de las fuerzas.

Este teorema fundamental de la dinámica se demuestra experimentalmente, en varios casos particulares, por medio del plano inclinado y de la máquina de Atwood, y su generalidad queda demostrada por la concordancia de sus consecuencias con todos los experimentos que han podido efectuarse.

1º *Caso del plano inclinado.* — Se mide el espacio e recorrido en t segundos y se tiene :

$$e = \frac{1}{2} \gamma t^2; \quad \text{de donde} \quad \gamma = \frac{2e}{t^2}.$$

Repitese varias veces el experimento haciendo variar la inclinación del plano y se miden los senos de las inclinaciones sucesivas $\alpha, \alpha', \alpha'' \dots$ *. Se ve que las aceleraciones $\gamma, \gamma', \gamma'' \dots$ son proporcionales a los senos, es decir que tendremos, con los errores de experimento,

$$\frac{\gamma}{\text{sen } \alpha} = \frac{\gamma'}{\text{sen } \alpha'} = \frac{\gamma''}{\text{sen } \alpha''} = \dots$$

Sabemos que las fuerzas sucesivas $F, F', F'' \dots$, que actuaban sobre el cuerpo, son también proporcionales a los senos de las inclinaciones. De donde se deduce que las aceleraciones $\gamma, \gamma', \gamma'' \dots$ son proporcionales a las fuerzas $F, F', F'' \dots$.

2º *Caso de la máquina de Atwood.* — Se toman dos masas (fig. 75) formadas cada una por un cierto número de rodajas de latón, de masas iguales, colocando en vez de k una rodaja más. De este modo, se efectúa un primer experimento, en el cual se mide el espacio e recorrido en t segundos (3 segundos: por ejemplo) y del que se deduce $\gamma = \frac{2e}{t^2}$.

Se ejecuta un segundo experimento, trasladando una rodaja a k tomada de la otra masa. Ahora, k contiene 3 rodajas: la fuerza aceleratriz se vuelve igual al peso de 3 rodajas; pero el cuerpo sobre que ésta actúa no cambia. Midiendo la aceleración γ' , se ve que es tres veces mayor que γ . Y, continuando de este modo, se nota que la aceleración es proporcional a la intensidad de la fuerza que produce el movimiento.

77. Definición dinámica de la masa. — 1º *Caso general.* — Supongamos que varias fuerzas constantes en magnitud y dirección, y de intensidades F, F', F'' , actúen sucesivamente sobre el mismo cuerpo y le impriman movimientos uniformemente acelerados, cuyas aceleraciones sean $\gamma, \gamma', \gamma'' \dots$, tendremos, según el principio precedente :

$$\frac{F}{\gamma} = \frac{F'}{\gamma'} = \frac{F''}{\gamma''} + \dots = m.$$

El valor común m de estas igualdades caracteriza al cuerpo con respecto a su resistencia al movimiento. En efecto, supongamos dos cuerpos de peso desigual sometidos al mismo esfuerzo de tracción F ; el más pesado se pondrá en movimiento con más lentitud que el otro, es decir que para él la aceleración γ será más pequeña y el cociente $\frac{F}{\gamma}$ mayor. Por esta razón, *el valor constante de la igualdad que existe entre la intensidad de una fuerza cualquiera actuando sobre un cuerpo y la*

* Para esto, basta medir la longitud AB (fig. 38) y la altura BC del punto B encima de la horizontal del punto A ; y se tendrá seno $\alpha = \frac{BC}{AB}$.

aceleración del movimiento adquirido por el cuerpo, se ha elegido como medida de la masa del cuerpo.

En el caso de una sola fuerza se tendrá pues :

$$F = m\gamma. \quad [1]$$

Esta definición numérica de la masa se confunde con la definición estática que antes dimos (§6).

En efecto, supongamos un cuerpo de peso p . Cuando cae libremente, toma un movimiento uniformemente acelerado de aceleración g .

Luego su masa es :

$$[2] \quad m = \frac{p}{g}; \quad \text{de donde} \quad p = mg. \quad [3]$$

Puesto que, en un lugar dado, la aceleración g es igual para todos los cuerpos, la relación [2] demuestra que, *si dos cuerpos tienen, en el lugar considerado, el mismo peso p (lo cual se verifica con la balanza), es que tienen la misma masa m .*

Si nos trasladamos a otro lugar, la aceleración de la caída de los cuerpos toma otro valor g' . Pero los dos cuerpos que tienen la misma masa m han adquirido, en el segundo lugar, pesos iguales a mg' : luego *dos cuerpos que tienen el mismo peso en un lugar, tienen también el mismo peso en todas partes.*

La aceleración de la caída de los cuerpos en un lugar es igual a la intensidad de la gravedad en dicho lugar (§7). — En efecto, si, en la igualdad [3], se hace $m = 1$, tendremos que $g = p$. Se ve que el número que mide la aceleración de la caída de los cuerpos es igual al número de unidades de fuerza que mide el peso de la unidad de masa.

78. Unidades de masa y de fuerza. — **Dina.** — Elegida ya la unidad de aceleración, la ecuación $F = m\gamma$ establece una relación entre la unidad de fuerza y la unidad de masa.

En el *sistema métrico* se escogió por unidad de fuerza el *gramo-peso* (§7), como unidad fundamental : la unidad de masa era una unidad derivada.

En el sistema C. G. S., al contrario, se ha elegido la unidad de masa, el *gramo* (§6), como unidad fundamental.

Si, ahora, en la ecuación $F = m\gamma$, se hace a $m = 1$, $\gamma = 1$; resultará $F = 1$. Luego : *la unidad de fuerza del sistema C. G. S. es la fuerza que, obrando sobre un cuerpo de 1 gramo de masa, le comunica un movimiento uniformemente acelerado, que tiene la unidad C. G. S. de aceleración.*

Esta unidad de fuerza ha recibido la denominación de *dina*. La dina es una fuerza de poquisima intensidad. En efecto, en París, la aceleración de la caída de un cuerpo es $g = 981$. En virtud de la igualdad $p = mg$, un cuerpo que tiene una masa de 1 gramo tiene un peso igual a 981 dinas, en París. Por lo tanto, la dina es apenas superior al peso de un miligramo.

Megadina. — De aquí resulta que las fuerzas usuales, expresadas en

dinas, dan números muy grandes. Para obviar este inconveniente, se usa, como *unidad secundaria*, la *megadina* que vale un millón de dinas (o 10^6 dinas). Así, el peso de un kilogramo, que, en París, es igual a 981000 dinas, vale 0,981 megadina, es decir, casi 1 megadina.

79. *Relación entre la aceleración en la máquina de Atwood y la aceleración en la caída libre.* — Supongamos que, en una máquina de Atwood, los pesos tengan una masa común M y que la masa adicional sea m . Supongamos también despreciable la masa de la polea, y sea γ la aceleración en la máquina. El peso $\mu = mg$ de la masa adicional actúa sobre la masa $2M + m$. La aceleración γ es tal que se tiene :

$$mg + (2M + m)\gamma, \quad \text{de donde} \quad \gamma = g \frac{m}{2M + m}.$$

Pero tengamos en cuenta la masa de la polea. Si toda esta masa estuviera concentrada en la rueda, es decir que si se moviera con la misma velocidad que las otras masas, bastaría para calcular la aceleración γ , con añadir la masa M' de la polea a las masas $2M + m$, y se tendría :

$$mg = (2M + m + M')\gamma.$$

Pero como toda la masa de la polea no está en su circunferencia, el término que se debe añadir a $2M + m$ es más pequeño que la masa de la polea; depende de la repartición de esta masa.

80. *Resistencia de los flúidos al movimiento. — Caída de los cuerpos en el aire.* — Cuando un cuerpo se mueve en el aire o en un flúido cualquiera, sufre fuertes resistencias. Si es simétrico respecto a una paralela a la dirección del movimiento, estas fuerzas tienen una resultante, en esa dirección, pero en sentido inverso. Esta aumenta con la velocidad del cuerpo. De aquí resulta que si un cuerpo cae en el aire de una grande altura, su velocidad aumenta primero y con ella la resistencia del aire. Cuando la resistencia del aire ha llegado a ser igual al peso del cuerpo, éste, estando sometido a dos fuerzas que se equilibran, su movimiento se ha hecho uniforme; se dice que ha llegado a su velocidad límite.

Leyes de la resistencia del aire. — Estas leyes no son conocidas de una manera completa.

Cailletet y Colardeau, entre otros, han hecho numerosos experimentos, de medida dejando caer un cuerpo de forma determinada y midiendo su velocidad límite; la resistencia del aire correspondiente a esta velocidad, es igual al peso del cuerpo. Poniendo progresivamente diferentes pesos en el cuerpo, sin cambiar su forma exterior, se pueden medir las resistencias correspondientes a velocidades cada vez mayores.

M. Eiffel ha hecho experimentos más recientes y precisos, empleando otro método que no requiere, como el anterior, una grande altura. El aparato empleado por M. Eiffel caía de una altura de 20 metros y su variado movimiento de caída se inscribía en un cilindro. El cuerpo, para el cual se quería medir la resistencia del aire, estaba colocado en la parte inferior del aparato, al que estaba unido por medio de un resorte dinamo-métrico, cuya inflexión de cada momento era también inscrita. Los datos dados por las inscripciones permitían calcular la resistencia del aire correspondiente a cada velocidad.

Resultados. — Para velocidades comprendidas entre 4 o 5 y 50 metros por segundó, *la resistencia del aire es sensiblemente proporcional al cuadrado de la velocidad del cuerpo en movimiento* *.

* Para grandes velocidades, como las de los proyectiles que arrojan las armas de fuego, la resistencia del aire no puede ser considerada como proporcional al cuadrado de la velocidad. Se admite que es proporcional a una potencia superior de la velocidad.

Para cuerpos geoméricamente semejantes, la resistencia del aire es *proporcional* a la *superficie de la sección principal* del cuerpo móvil. Es la sección de mayor superficie hecha en el cuerpo, perpendicularmente a la dirección del movimiento (para una esfera, por ejemplo, es la superficie de un círculo máximo).

Se tiene, pues, para expresar la resistencia del aire, la fórmula

$$F = \varphi sv^2,$$

en la que s representa la superficie de la sección principal y v la velocidad; φ es un coeficiente, constante para los cuerpos semejantes, pero que difiere para cuerpos de formas diferentes.

Caso del plano delgado ortogonal. — Llámase así una placa dura de espesor despreciable, que se mueve perpendicularmente a su plano (fig. 79, I); entonces el coeficiente φ se designa generalmente con la letra K ; depende un poco de la forma de la superficie (que puede ser

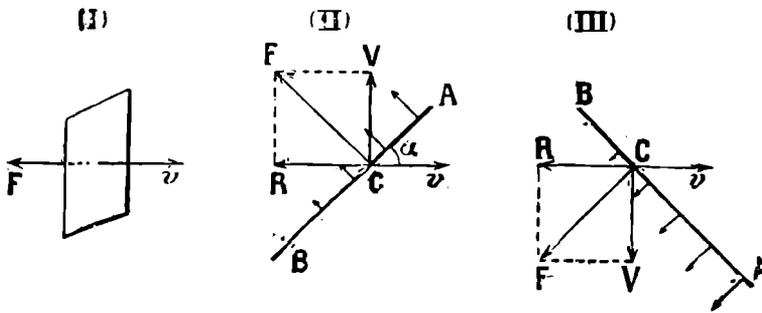


Fig. 79.

cuadrada, circular, rectangular, etc.). Su valor medio es 0,075, cuando se valúa la superficie en metros cuadrados, y la velocidad v en metros por segundo*. Se tiene entonces :

$$F = Ksv^2 = 0,075 \cdot s \cdot v^2$$

Para $s = 1$, $v = 1$, se tiene $F = 0,075$; luego un plano, de 1 m² movido normalmente a sí mismo, con una velocidad de 1 metro por segundo, encuentra en el aire una resistencia igual a 0,0075 kg. peso. Con las unidades C. G. S., se tiene $K = \frac{75g}{10^8}$.

Caso de una esfera. — Para una esfera, φ igual $\frac{K}{6}$ aproximadamente.

Casos diversos. — Para un hemisferio hueco, cuya concavidad está detrás del movimiento, φ tiene un valor doble del que corresponde a la esfera entera; esto depende de los remolinos que se forman en el aire detrás del cuerpo. Si el hemisferio tiene su concavidad por delante,

* Este número y los siguientes son relativos a la temperatura 0° y a la presión atmosférica normal; porque el coeficiente φ es proporcional a la densidad del aire; varía, pues, con la presión y con la temperatura.

φ toma un valor doce veces mayor que para la esfera entera. Los cuerpos de forma puntiaguda por delante tienen un débil coeficiente φ , sobre todo si al mismo tiempo son puntiagudos por detrás (como los globos dirigibles), lo cual suprime los remolinos.

Caso de un plano delgado movido oblicuamente. — Representemos la sección del plano por un plano de simetría paralela a la dirección del movimiento (fig. 79, II).

Si la superficie es muy lisa, la resistencia del aire es aún una fuerza F , normal al plano : su intensidad es proporcional al seno del ángulo α que el plano forma con la dirección de la velocidad v ; luego

$$F = Ksv^2 \text{ seno } \alpha.$$

Esta fuerza se aplica en un punto C , llamado *centro de presión*, más cerca del borde anterior A que del posterior B . Esto depende de que siendo más difícil la salida del aire en CA que en CB , la resistencia en cada unidad de superficie es mayor.

F se descompone en otras dos : R , opuesta a la velocidad v , llamada *resistencia al avance*, y V perpendicular a v . Si el plano se mueve horizontalmente, de modo que el aire le dé por debajo, la fuerza V tiende a levantarlo; llámase *componente sostenedora*. Si el aire hiere la superficie por encima, la componente V es dirigida entonces hacia abajo (fig. 79, III).

81. **Aplicaciones de la resistencia del aire.** — 1º *Cálculo de la velocidad límite de caída.* — Escribamos que en el momento en que se ha alcanzado el límite de velocidad, la resistencia del aire es igual al peso del cuerpo :

$$mg = \varphi sv^2, \quad \text{de donde} \quad v = \frac{\sqrt{mg}}{\varphi s}.$$

El caso más sencillo, teóricamente, es el de la esfera. Sean R el radio de la esfera y d su densidad : tendremos :

$$m = \frac{4}{3} \pi R^3 d \quad \text{y} \quad s = \pi R^2;$$

de donde

$$v = \frac{\sqrt{4Rdg}}{3\varphi}.$$

Reemplazando g y φ por sus valores numéricos, se tiene sensiblemente :

$$v = \frac{10\,000}{3} \sqrt{Rd} \text{ cm. por segundo.}$$

La velocidad límite que alcanza una esfera que cae en el aire, es proporcional a la raíz cuadrada de su densidad y a la raíz cuadrada de su radio.

Así se calculan, para esferas de cobre (densidad $d = 8,9$), de aluminio ($d = 2,5$), de cristal ($d = 0,92$) de 1 centímetro de radio, las velocidades límites siguientes :

Para la esfera de cobre 100^m por segundo ;

Para la de aluminio 50^m por segundo.

Para la de cristal 30^m por segundo.

Por este ejemplo se ve que un granizo, que puede asemejarse a una esfera de cristal, no puede llegar al suelo sino con velocidad limitada. Por otra parte, esta velocidad aumenta con el diámetro de la esfera : por eso los efectos devastadores del granizo crecen rápidamente con el tamaño de éste.

Variación de la velocidad límite con el diámetro. — *Caso de las gotas de agua.* — Mien-

tras que la velocidad límite de una gota de agua de 4 mm. de diámetro es 15 metros por segundo, la de una gotita de 1 milímetro es dos veces más pequeña. Así se concibe por qué las gotas de lluvia caen tanto más aprisa cuanto más gruesas son. En cuanto a las gotitas diminutas que forman las nieblas y las nubes, caen con mucha lentitud : no se les puede aplicar la fórmula precedente, porque no conviene para velocidades tan pequeñas.

2º *Aeroplanos.* — El efecto sostenedor de la resistencia del aire sobre una superficie oblicua. se utiliza en los aeroplanos (187).

82. La relación $F = m\gamma$ es una ecuación geométrica. — Fuerza centrípeta. — Supongamos, que un punto material M (fig. 80), de masa m , describe una trayectoria cualquiera y que posee, en un momento dado, una aceleración representada por el vector $MJ = \gamma$. Admitimos que, en este momento, se halla sometido a una fuerza MF , de iguales dirección y sentido que la aceleración MJ , y cuya intensidad es $F = m\gamma$. De este modo, generalizamos la igualdad $F = m\gamma$. Entonces, se dice que esta razón es una *ecuación geométrica*.

La generalización que precede se halla justificada

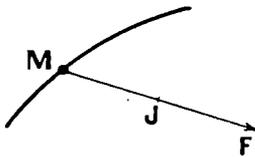


Fig. 80.

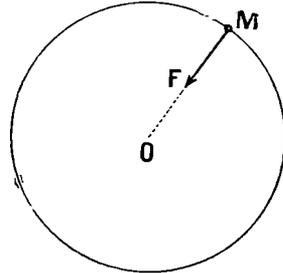


Fig. 81.

por la exactitud de sus consecuencias, y, sobre todo, por las propiedades del movimiento circular uniforme.

Fuerza centrípeta. — Supongamos que un punto material M (fig. 81) esté animado de un movimiento circular uniforme, de velocidad angular ω , y sea R el radio de la circunferencia descrita por el punto. Sabemos que posee, en cualquier momento, una aceleración dirigida hacia el centro, y de magnitud $\omega^2 R$ (65). Por consiguiente, en virtud del principio que antecede, debe estar sometido a una fuerza dirigida hacia el centro, y de intensidad $F = m\omega^2 R$. Esta fuerza recibe el nombre de *fuerza centrípeta*.

Fácilmente se conoce su existencia por un sencillo experimento que consiste en dar vueltas a un peso atado de un hilo. Si se suelta el hilo, el peso abandona su trayectoria circular siguiendo primero la tangente a esta circunferencia. Y, cuando se quiere sostener el movimiento circular, se nota que el hilo se tuerce y ejerce sobre el cuerpo una fuerza centrípeta.

83. *Fuerza centrífuga.* — La fuerza centrípeta no puede existir sin llevar consigo la existencia de una reacción contraria que es la que ejerce el cuerpo sobre el hilo, y se llama fuerza centrífuga, porque es dirigida del centro hacia la circunferencia.

Efectos de la fuerza centrífuga. — 1º *Rotura de muelas, volantes, etc.* — Cuando la velocidad de un cuerpo giratorio se hace muy grande, si no es bastante resistente, la fuerza centrífuga puede romperlo. Así es cómo ocurren los accidentes de rotura de las muelas y de los volantes de los motores.

2º *Ejercicio acrobático del looping (circulo, bucle o anillo de la muerte).* — El ejercicio acrobático en que un velocipedista recorre una pista circular colocada verticalmente (*looping*) es una aplicación inmediata de la fuerza centrífuga. En el punto más peligroso del movimiento, es decir, cuando el acróbata se halla en la parte más alta de la pista con la cabeza hacia abajo, éste no cae, si su velocidad es suficientemente grande para que la fuerza centrífuga $m\omega^2 R$ sea superior a su peso mg .

3º *Reguladores de fuerza centrífuga.* — Supongamos que, en lo alto de una barra ver-

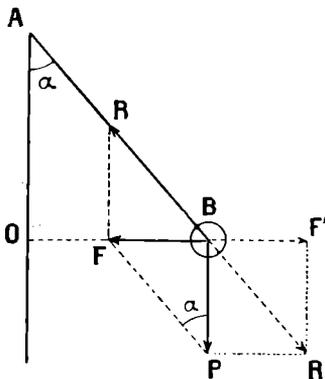


Fig. 82.

tial OA (fig. 82). se encuentra un eje horizontal, alrededor del cual puede girar un brazo, provisto, en su extremo, de una bola pesada. El experimento demuestra que cuando se hace girar la barra vortical, el brazo se separa de la vertical, tanto más cuanto mayor es la velocidad de rotación. Este es el principio de los *reguladores de fuerza centrífuga* (351). Vamos a demostrar que la inclinación adoptada por AB es la misma que si el eje OA no diera vueltas y se aplicase a la bola B, al mismo tiempo que su peso P, una fuerza centrífuga P' , dirigida según el radio OB de la circunferencia descrita por el centro de la bola y cuya intensidad $m\omega^2 \times OB$ (m , masa de la bola, ω , velocidad angular de rotación.)

Estas dos fuerzas tendrían por resultante la fuerza BR'. El brazo AB se dirigiría siguiendo la prolongación de BR' formando con OA un ángulo α , y AB reaccionaría con una fuerza BR igual y opuesta. La bola B estaría entonces sometida a las dos fuerzas BP y BR, que tienen por resultante BF igual y opuesta a BF'; esta resultante BF realiza, pues, la fuerza centripeta necesaria para el movimiento circular de B.

Cálculo de la inclinación α . — Designemos por l la longitud del brazo AB. Tenemos $OB = l \text{ sen. } \alpha$. Luego la fuerza centripeta es igual a $m\omega^2 l \text{ sen. } \alpha$. Por otra parte, en el triángulo FBP se tiene :

$$F = P \text{ tg } \alpha = mg \text{ tg } \alpha; \quad \text{de donde} \quad \omega^2 l \text{ seno } \alpha = g \text{ tg } \alpha.$$

De aquí se deduce $\cos \alpha = \frac{g}{\omega^2 l}.$

4º *Inclinación de los rieles de ferrocarriles en las curvas y de las pistas de velódromos.* — Por análogo razonamiento, se explicaría la inclinación que se debe dar a los carriles en las curvas y la de las pistas de velódromo en las vueltas. En este último caso, por ejemplo, el velocipedista no tendrá ninguna probabilidad de caer, si la pista es normal a la resultante (tal como BR', fig. 82) de su peso y de la fuerza centrífuga.

5º *Secadoras y desnatadoras.* — Se seca la ropa blanca en cilindros cuya superficie externa está guarnecida de una tela metálica, haciéndoles girar rápidamente. La fuerza centrífuga despidió el agua afuera. En las *desnatadoras de fuerza centrífuga* se hace girar un vaso cilíndrico que contiene la leche cuya crema de desea separar : la crema, por ser menos densa, se junta en el centro.

6º *Aparatos centrifugadores de laboratorios.* — A M. d'Arsonval se debe la primera idea de estos aparatos. Estos comprenden tubos T (fig. 83) móviles al rededor de ejes horizontales fijos en un soporte S, que gira al rededor de un eje vertical, al cual se le imprime un movimiento muy rápido, sea con la mano, sea con un motor eléctrico (entonces llega hasta 800 vueltas por minuto). Cuando se mete en los tubos un líquido con un precipitado más denso en suspensión, la fuerza centrífuga inclina al principio los tubos casi horizontalmente, acumula el precipitado en su fondo, y se separa el líquido por decantación. De este modo se ahorra el empleo de los filtros de papel.

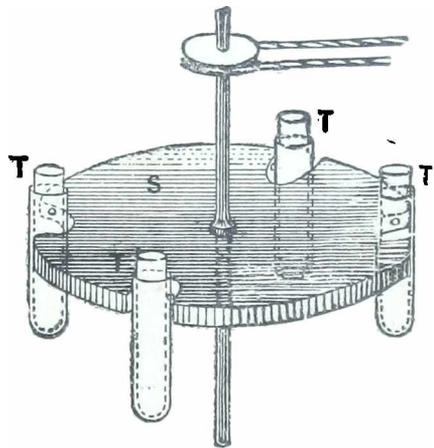


Fig. 83.

También se pueden separar rápidamente dos líquidos de densidades diferentes, uno de los cuales está en suspensión en el otro en forma de finas gotitas.

Como aplicación de este método, vamos a citar el procedimiento práctico y rápido instituido por Bordas y Touplain para el análisis de la leche.

1º Se tratan 10 cm³ de leche por 25 cm³ de alcohol acidulado por ácido acético, que coagula la caseína; por centrifugación se separa ésta del líquido que contiene la lactosa, que entonces se puede dosificar ;

2º El coágulo se trata por alcohol mezclado de éter, que disuelve la materia grasa (mantequilla); por la fuerza centrífuga se separa la solución y se dosifica la mantequilla por pesada, después de haber evaporado el líquido ;

3º Se seca y pesa el coágulo que quedó en el tubo; se quema y se pesan las cenizas, que constituyen la materia mineral de la leche; la diferencia de la masa de coagulación y la de las cenizas es la masa de caseína.

81. Principio de independencia de la acción de una fuerza y del movimiento anteriormente adquirido — Cuando una fuerza constante en magnitud y en dirección actúa sobre un punto material que forma parte de un sistema entero animado de un movimiento uniforme de velocidad V , le comunica, en este sistema, un movimiento relativo, que es el mismo que si el sistema hubiera estado en reposo.

Por ejemplo, cuando un cuerpo cae en un vagón en movimiento uniforme, toma, con relación a las paredes del vagón, el mismo movimiento que si el vagón hubiese estado en reposo. Pero, con relación a un observador situado fuera del vagón, el movimiento es muy diferente; se obtiene componiendo el movimiento de caída del cuerpo y el movimiento del vagón.

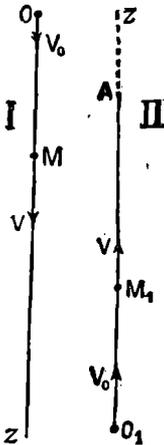


Fig. 84.

85. Movimiento de los proyectiles. — Aquí, sólo vamos a examinar el caso sencillo, y por otra parte puramente teórico, de un punto material lanzado en el vacío.

1. Se lanza el proyectil verticalmente de arriba abajo. — Sea O (fig. 84. I) el punto de donde se lanza el móvil con la velocidad v_0 . Si no estuviera sujeto a la gravedad, en el tiempo t , habría conservado la misma velocidad v_0 y habría recorrido el espacio $v_0 t$. Por otra parte, si hubiera caído sin velocidad inicial, habría adquirido la velocidad gt y recorrido el espacio $\frac{1}{2}gt^2$. En virtud del principio precedente tendrá, pues, la velocidad v en el tiempo t ,

$$v = v_0 + gt, \tag{1}$$

y habrá recorrido el espacio e ,

$$e = v_0 t + \frac{1}{2}gt^2. \tag{2}$$

II. — Se lanza el proyectil verticalmente de abajo arriba. Por razonamiento análogo al precedente se ve que en el tiempo t la velocidad v y el espacio recorrido e están dados por las ecuaciones

$$[1] \quad v = v_0 - gt, \quad e = v_0 t - \frac{1}{2}gt^2. \tag{2}$$

Al principio el móvil está animado de un movimiento *uniformemente retardado*. Se detiene al cabo de un tiempo θ , dado por la ecuación [1], donde se tiene $v = 0$,

$$0 = v_0 - g\theta, \quad \text{de donde} \quad \theta = \frac{v_0}{g}.$$

Altura máxima del proyectil. — Esta altura h se obtiene haciendo $t = \theta$ en la ecuación [2]. Así se tiene

$$h = \frac{v_0^2}{2g}.$$

Vuelta del proyectil. — A partir del instante θ , que tomaremos como nuevo origen de tiempo, el proyectil cae con un movimiento uniformemente acelerado cuyas ecuaciones son :

$$[1'] \quad v' = gt', \quad e' = \frac{1}{2}gt'^2 \tag{2'}$$

Habrá vuelto al punto de partida en un tiempo θ' , que se obtendrá haciendo $e' = h$ en la ecuación [2'] :

$$h = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{1}{2}g\theta'^2, \quad \text{de donde} \quad \theta' = \frac{v_0}{g} = \theta.$$

Se ve que la duración de la caída es igual a la del ascenso.

Velocidad en el punto de llegada. — Llegado al punto de partida, el proyectil tiene una velocidad v' que se obtiene haciendo $t = \theta'$ en la ecuación [1']. De donde

$$v' = g \frac{v_0}{g} = v_0.$$

Luego al llegar al suelo volvió a adquirir su velocidad inicial de propulsión.

III. — Se lanza el proyectil horizontalmente. — Sea v_0 la velocidad inicial; si no actuara la gravedad, al cabo del tiempo t , el móvil se hallaría en m (fig. 85), a una distancia

$$Om = x = v_0 t. \tag{1}$$

Pero la gravedad, que actúa como si el móvil hubiese partido del reposo, lo ha hecho descondor, durante el tiempo t , una cantidad

$$mM = z = \frac{1}{2}gt^2. \quad]$$

La ecuación de la trayectoria se obtiene eliminando t entre las ecuaciones [1] y Se tiene

$$[3] \quad z = \frac{g}{2v_0^2}x^2.$$

Esta ecuación representa una parábola que tiene por eje OV y por tangente en el vértice OH .

IV. *La velocidad inicial se inclina un ángulo α sobre el horizonte.* — Es el caso ordinario y práctico del movimiento de los proyectiles. La velocidad inicial se dirige según Ov_0 (fig. 86).

Si el móvil no fuera grave, hubiera descrito, durante el tiempo t , el espacio $Om = v_0t$. Pero, al mismo tiempo,

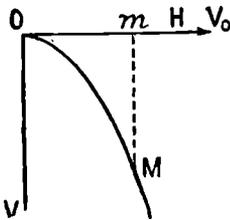


Fig. 85.

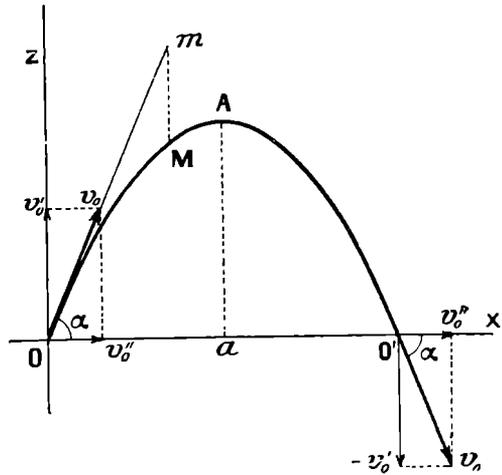


Fig. 86.

ha caído de la altura $mM = \frac{1}{2}gt^2$. Está, pues, en el punto M .

Las coordenadas de M son

$$\begin{aligned} \text{o} \quad & \text{Op} = Om \cos \alpha \\ \text{y} \quad & x = v_0t \cos \alpha \end{aligned} \quad [1]$$

$$\text{o} \quad \text{pM} = pm - mM. \quad [2]$$

Eliminando a t entre [1] y [2], se tiene :

$$z = xt g \alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}.$$

estando expresada z por un trinomio de segundo grado en x (de término constante nulo), la curva es una parábola. Se ve que el proyectil debe subir, en un tiempo dado, a la misma altura que si hubiera sido lanzado verticalmente con una velocidad $v'_0 = v_0 \text{ seno } \alpha$, que es la componente de la velocidad v_0 , siguiendo el eje de las z . Llega, pues, a su punto culminante A , que es el vértice de la parábola, al cabo de un tiempo $\frac{v_0 \text{ seno } \alpha}{g}$, y

este vértice está a una altura $aA = \frac{v_0^2 \text{ seno}^2 \alpha}{2g}$. Además, recorre una distancia horizontal con la velocidad $v_0 \cos \alpha$, que es la proyección de v_0 , sobre el eje de las x . Por consiguiente, la distancia Oa es igual a

$$\overline{Oa} = v_0 \cos \alpha \times \frac{v_0 \text{ sen. } \alpha}{g} = \frac{v_0^2 \text{ sen. } 2\alpha}{2g}.$$

El proyectil vuelve a encontrar a la horizontal OX después de recorrer el espacio $OO' = 2Oa$; por lo tanto

$$OO' = \frac{v_0^2 \text{ sen. } 2\alpha}{g}.$$

Esta magnitud se denomina *amplitud o alcance de la trayectoria*. Se ve que es máxima,

para una velocidad v_0 dada, cuando $\text{sen. } 2\alpha = 1$, es decir, cuando $\alpha = 45^\circ$. Entonces es igual a $\frac{v_0^2}{g}$.

Finalmente, cuando el móvil llega al punto O' , la velocidad vertical vuelve a ser la misma que en O ; pero cambia de signo. La velocidad horizontal continúa igual. De aquí se deduce que la velocidad del proyectil, que se obtiene componiendo $-v_0 \sin \alpha$ con $v_0 \cos \alpha$, es igual a la velocidad v_0 a su salida, y que forma, bajo el horizonte, el ángulo α , que formaba por encima v_0 .

86. Problema del tiro. — El problema del tiro consiste en determinar el ángulo bajo el

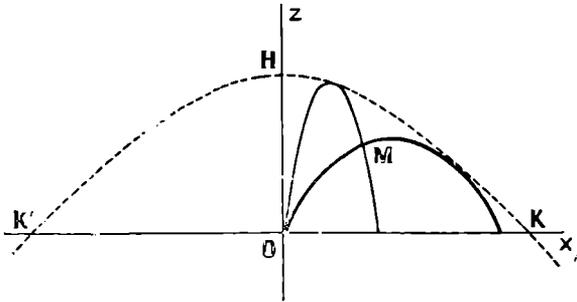


Fig. 87.

cual se debe disparar un proyectil con una velocidad inicial determinada, para que haga blanco en un punto dado M (fig. 87).

Se demuestra que si el punto en cuestión es interior a cierta parábola KHK' llamada parábola de seguridad, puede ser tocado cuando se da a la velocidad inicial dos inclinaciones; pues el proyectil describe, en cada una de éstas, una parábola distinta.

Si el punto M se halla en la parábola de seguridad, sólo puede ser alcanzado por una

sola parábola. Finalmente, si es exterior a la parábola de seguridad, no puede ser tocado por un proyectil que se dispare con la velocidad v_0 .

En cuanto a la parábola de seguridad, tiene también su eje según Oz . Su vértice H , se encuentra en este eje, a la altura $OH = \frac{v_0^2}{2g}$, a que llegaría un proyectil disparado verticalmente siguiendo Oz , con la velocidad v_0 .

Esta parábola corta el eje de las x , en dos puntos KK' simétricos, situados a distancias $OK' = OK$, de O , iguales a la amplitud máxima de la trayectoria.

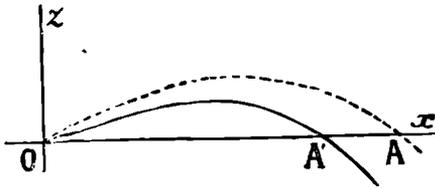


Fig. 88.

Influencia de la resistencia del aire. — La trayectoria en el aire (fig. 88) no tiene forma parabólica. Como la velocidad en el aire es, en cada momento, después de la salida, más pequeña que en el vacío, la trayectoria descrita en el aire está, para un ángulo dado α , en el interior de la parábola correspondiente al movimiento en el

vacío. Alcanza menor altura y posee una amplitud más pequeña. Además, la caída tiende a volverse vertical (pues la curva tiene una asíntota vertical), y la velocidad tiende a la velocidad límite de caída que ya hemos definido (81).

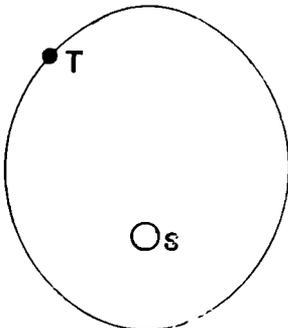


Fig. 89.

87. Atracción o gravitación universal. —

Hipótesis o ley de Newton. — En su movimiento al rededor del Sol los planetas describen elipses, uno de cuyos focos ocupa el Sol. Tal es la órbita de la Tierra (fig. 89).

Newton explicó la forma de la trayectoria y las demás leyes del movimiento de los planetas (leyes de Kepler) por medio de la *hipótesis de la atracción universal* (o *gravitación universal*), que puede formularse así :

Quando dos puntos materiales están a cierta distancia uno de otro, sucede como si se atrajeran con una fuerza dirigida

siguiendo la recta que los une y cuya intensidad es proporcional al cuadrado de la distancia.

Expresión de la ley de Newton. — Sean m, m' las masas de dos puntos materiales, situados a una distancia d . La fuerza de atracción f con que se atraen se expresa, según la ley de Newton con esta fórmula :

$$f = K \frac{mm'}{d^2} .$$

K es una constante cuya significación es fácil de encontrar. En efecto, si $m = 1, m' = 1, d = 1$, se tiene $f = K$. Luego K es el número de unidades de fuerza que mide la atracción de dos masas iguales a la unidad, colocadas a la unidad de distancia.

Los experimentos de medida han probado que $K = 6.65 \times 10^{-8}$ en unidades C. G. S. (89).

88. Comparación de la gravedad a la atracción newtoniana. — Es lógico atribuir la gravedad a la atracción newtoniana que ejerce la Tierra sobre los cuerpos. Un proyectil M (fig. 90) lanzado desde un punto A , debería describir una elipse que tuviera uno de sus focos en el centro O del globo; pero como este punto está muy alejado, la trayectoria debe parecerse una parábola.

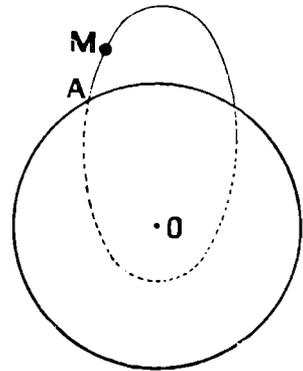


Fig. 90.

Por otra parte, se demuestra que, en virtud de la ley de Newton, una esfera debe atraer los puntos materiales exteriores como si toda su masa estuviera concentrada en su centro. La atracción de la Tierra sobre un cuerpo debe, por tanto, ir dirigida hacia el centro del globo : esta es una de las propiedades de la gravedad. Además, la atracción terrestre debe ser independiente de las sustancias de los cuerpos sobre que se ejerce y proporcional a sus masas. Estas son leyes a que la gravedad obedece.

Finalmente, la concordancia de los resultados de los experimentos, y de la hipótesis de la gravitación se hace aún más aparente, por un cálculo aproximado que permite deducir del movimiento platenario de la Luna, un valor aproximado de la aceleración de la gravedad.

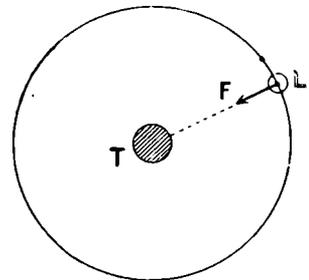


Fig. 91.

Se sabe que la Luna L (fig. 91) describe alrededor de la Tierra T , una órbita elíptica; pero, dada su ligera excentricidad, podemos suponerla circular. El radio R de esta órbita, que es la distancia de la Tierra a la Luna, es igual a 60 veces la longitud del radio terrestre r . Es decir que $R = 60 r$.

Por otra parte, la duración de la revolución de la Luna es de 27 días y $1/3$, o sea, $T = 2361600$ segundos. La velocidad angular ω del movimiento circular de la Luna, supuesto uniforme, es, pues, $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

Si llamamos m a la masa de la Luna, la fuerza centrípeta es $m\omega^2R$. Esta fuerza no es sino la atracción terrestre. En consecuencia, la intensidad de la fuerza que ejerce la tierra sobre una masa de 1 gr. colocada a la distancia de la Luna es ω^2R .

Por otra parte, la intensidad g de la gravedad en la superficie terrestre es la fuerza de atracción que la Tierra ejerce sobre la unidad de masa colocada en su superficie, es decir, a la distancia r del centro de atracción. Luego, según la ley de Newton, tendremos;

$$\frac{g}{\omega^2R} = \frac{R^2}{r^2}.$$

De donde

$$g = \frac{\omega^2R^3}{r^2} = \frac{4\pi^2 \cdot 60^3 \cdot r^3}{T^2 r^2} = \frac{4\pi^2 \cdot 60^3 \cdot r}{T^2}.$$

Notemos que $2\pi r$, longitud de un círculo máximo de la esfera terrestre, vale 4000 kilómetros, o sea 400000000 o 4×10^8 centímetros.

Luego

$$g = \frac{2\pi \times 60^3 \times 4 \times 10^8}{T^2}.$$

Sustituyendo a T y π por sus valores, resulta $g = 973$. Esta cifra difiere muy poco del valor medio de g , determinado directamente en la superficie del globo. Este resultado puede considerarse como una buena comprobación cuantitativa de la exactitud de la ley de Newton.

89. Estudio experimental de la atracción universal. — 1° *Desviación de la plomada por las montañas.* — Las primeras investigaciones de la atracción universal en la superficie de la Tierra han tenido por objeto la manifestación y medida de la desviación que una montaña ejerce, por su atracción, sobre una plomada colocada en su proximidad. Si la masa de la montaña fuese conocida, así como la repartición de esta masa, se podría deducir, de la medida de la desviación, la constante de la gravitación. Pero se comprende cuán incierto es este cálculo. De todos modos, el fenómeno de la desviación de la plomada por las montañas es una prueba directa de la *Atracción newtoniana*. En primer lugar, fué establecido por Bouguer y La Condamine, en 1736, en el Chimborazo (hallaron una des-

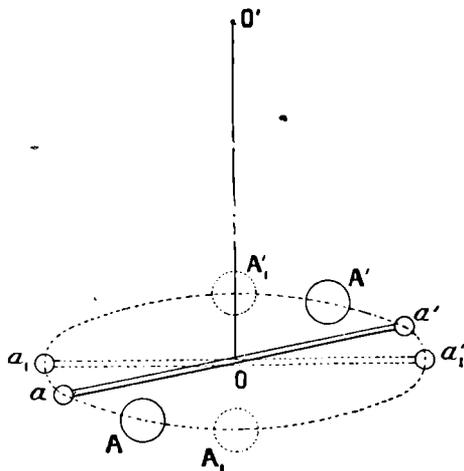


Fig. 92.

vación de $7''.5$); luego, por Maskelyne, en 1778, en el monte Schehallien, en Escocia (encontró $11''.66$).

2° *Medida de la constante de la gravitación. — Métodos directos.* — Los métodos directos más exactos, son perfeccionamientos del empleado por Cavendish, en 1798. El aparato de Cavendish era una *balanza de torsión* y cuyo principio es el siguiente :

Un largo hilo metálico OO' (fig. 92), suspendido de O' , llevaba en su extremo una pequeña palanca de madera, terminada por dos esferitas de platino a, a' . En la circunferencia que pueden describir los centros de las esferas al torcer el hilo, se podía colocar los centros de dos grandes esferas de plomo, instaladas en un soporte. Colocábase, primero, estas esferas en A, A' , de manera que la línea que unía sus centros fuese perpendicular a a, a' . Las atracciones que éstas ejercían sobre las esferas de platino, se equilibraban, y no se producía ninguna desviación de la palanca en que se notase la posición a, a' . Luego, se movían las esferas de plomo, conduciéndolas a AA' , cerca de aa' y a distancias iguales. Como las esferas de platino eran atraídas, la palanca se movía formando un pequeño ángulo α cuya medida se tomaba. A consecuencia de un estudio previo del hilo, podían deducirse, del ángulo α , las fuerzas que producían la desviación. También se conocían las masas atrayentes y las distancias de los centros de las esferas. De la fórmula de Newton se podía, pues, deducir la constante K .

Experimentos fundados en el mismo principio han sido efectuados por Reich, en 1837 y 1852; por Baily, en 1841; por Cornu y Baille, en 1870; por Vernon Boys, en 1898 y por Burgess, en 1900, en el laboratorio de indagaciones físicas de la Sorbona.

El valor de la constante de la gravitación que se ha encontrado es $6,67 \times 10^{-8}$, en unidades C. G. S.

3º *Masa de la Tierra.* — Sean M. la masa, R el radio de la Tierra y g la intensidad de la gravedad; tendremos :

$$g = \frac{KM}{R^2}, \quad \text{de donde} \quad M = \frac{gR^2}{K}.$$

Reemplazando las letras por su valor, resulta :

$$M = 6,5 \times 10^{27} \text{ gramos.}$$

4º *Densidad media de la Tierra.* — El cociente de la masa de la Tierra por su volumen representa su densidad media d . Como el volumen es conocido, se deduce que $d = 5,5$. La densidad de las rocas superficiales no llega a 3; luego hay que deducir que, hacia el centro de la Tierra, existen cuerpos más densos que estas rocas.

Constitución del globo terrestre. — Esta conclusión está de acuerdo con la teoría universalmente admitida sobre la formación del globo. Se supone, en efecto, que la Tierra estaba formada, al principio, de un esferoide líquido, en el cual los materiales más densos debieron de ir al centro.

Por otra parte, se sabe que la temperatura aumenta un grado cuando se baja a una profundidad igual a 33 metros próximamente. De aquí se debe deducir que la temperatura es extremadamente elevada en las regiones centrales del globo. Es cosa de preguntarse en qué estado se encuentra la materia que ocupa esas regiones. La idea más sencilla es que esa materia está en fusión y que las capas superficiales sólidas sólo forman una costra bastante delgada. Pero la acción de la Luna y del Sol debería crear, en la masa líquida, mareas incomparablemente más fuertes que las del océano, capaces de dislocar las capas superficiales. Para explicar la estabilidad de la Tierra, el cálculo demuestra que hay que atribuir a la parte central una dureza comparable a la del acero. Además, esta parte soporta la presión formidable que ejerce el peso de las capas superiores, y, bajo esta presión, es posible que, a pesar de su alta temperatura las materias sean sólidas. Por eso hay muchos geólogos que admiten la hipótesis siguiente :

El globo comprendería una capa superficial rocosa, la *litosfera*, de espesor máximo 100 km., después una capa líquida, la *pirosfera* (espesor hipotético 300 km), y en fin una esfera sólida interior (diámetro 6 000 km) la *barisfera*. A esta última se la supone de densidad 8 poco más o menos y formada de hierro carburado (como los aerolitos, que serían los fragmentos del núcleo central de un astro destruido).

CAPÍTULO VII

TRABAJO DE LAS FUERZAS. — ENERGÍA

90. **Trabajo de una fuerza.** — Se dice que una fuerza cumple un trabajo mecánico, cuando su punto de aplicación cambia de lugar.

Cuando se aplica una fuerza sin que se verifique esta condición, como, por ejemplo, cuando se mantiene elevado un cuerpo por cima del suelo, sin moverlo, no se cumple ningún trabajo; pero se cumple un trabajo, si se levanta a cierta altura.

1º *Caso más sencillo.* — Es el de una fuerza constante en magnitud y

* Los experimentos de M. Tammann (280) han demostrado que cuando la presión aumenta, la temperatura de fusión de un sólido crece primero, pero pasa por un máximo y disminuye. Así, pues, parece que estos experimentos no concuerdan con la hipótesis de un núcleo sólido; pero no se ha podido llevar estos experimentos hasta una presión comparable, ni con mucho, a la que reina en el centro de la Tierra; de modo que no aminoran la fuerza de la hipótesis en cuestión.

dirección que mueve su punto de apoyo en su propia dirección. Esto ocurre, por ejemplo, cuando se levanta un cuerpo A (fig. 93), de A a B, por medio de una fuerza F igual a su peso P . En este caso, se expresa el trabajo T por el producto de los números que miden la intensidad F de la fuerza y el movimiento e . Es decir:

$$T = Fe.$$

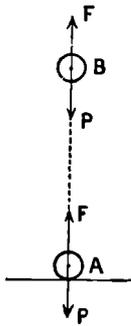


Fig. 93.

Trabajo motor y trabajo resistente. — Se dice que una fuerza cumple un *trabajo motor* cuando el cambio de lugar se verifica en el sentido de aquélla.

En el caso contrario, el trabajo se llama *resistente*. Por ejemplo, en el movimiento de un peso de A a B, la fuerza F cumple un *trabajo motor*, mientras que el peso P cumple un *trabajo resistente*.

Se ha convenido anteponer el signo $+$ al trabajo motor y el signo $-$ al trabajo resistente.

2º Caso en que el cambio de lugar no se verifica en la dirección de la fuerza. — Entonces, se llama *trabajo de la fuerza* el producto de la intensidad de esta fuerza por la proyección del cambio de lugar sobre su dirección.

Si e representa el cambio de lugar AB (fig. 94), F la intensidad de la fuerza, α el ángulo de las direcciones de la fuerza y del movimiento, tendremos:

$$T = F \times AB', \quad \text{o} \quad T = Fe \coseno \alpha.$$

En el caso en que α es agudo (fig. 94), el trabajo de la fuerza es motor; si es obtuso (fig. 95), el trabajo de la fuerza es resistente. Por

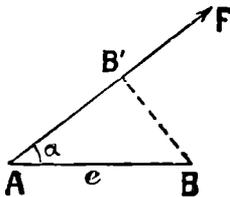


Fig. 94.

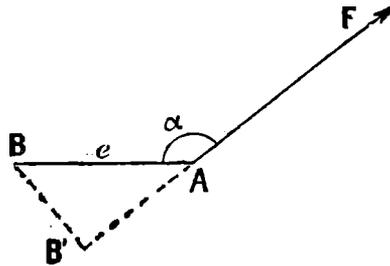


Fig. 95.

otra parte, la fórmula anterior da, para T , un valor positivo ($\cos. \alpha > 0$), en el primer caso, y negativo ($\cos. \alpha < 0$), en el segundo.

Caso particular. — Cuando el ángulo $\alpha = 90^\circ$, es decir, cuando la fuerza es perpendicular al movimiento, *el trabajo es nulo*.

3º Caso de una fuerza constante en dirección y magnitud y de movimiento cualquiera. — Supongamos que se mueve un cuerpo grave, A, de A a B (fig. 96), por un camino cualquiera. Durante todo el movimiento, se hace actuar una fuerza F igual y directamente opuesta al peso P del cuerpo.

El trabajo es el producto de la fuerza por la proyección del arco de trayectoria AB sobre la dirección constante BA' de la fuerza :

$$T = P \times A'B.$$

En efecto, sea el traslado elemental de M a M', ya que no se debe considerar como rectilíneo el arco de curva MM' por ser muy pequeño. El trabajo correspondiente a este traslado es $P \times Mm'$, o $P \times mm'$. Y para tener el trabajo total de P durante el traslado, hay que hacer la suma de todos los trabajos elementales de A a B. Esta suma es $P \times A'B$.

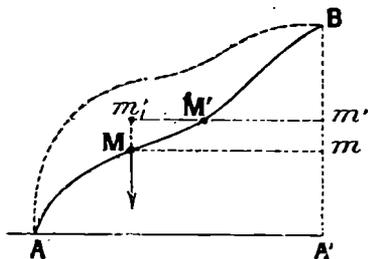


Fig. 96.

De aquí resulta que el trabajo de la fuerza es el mismo cuando el traslado se verifica siguiendo el arco AMB, o siguiendo otra curva que tenga los mismos extremos. Se ve igualmente que el trabajo necesario para levantar un fardo de peso P, no depende del camino seguido, sino sólo de la diferencia de niveles h entre el punto de partida y el de llegada.

Este es $T = Ph$.

4º Caso de una fuerza y de un movimiento cualesquiera. — Supongamos que la fuerza no sea constante ni en magnitud ni en dirección. Para valuar el trabajo correspondiente a un movimiento cualquiera, rectilíneo o curvilíneo, hay que descomponer este movimiento en elementos lo bastante pequeños para que, durante cada uno de ellos, la fuerza pueda considerarse como constante y el movimiento, a su vez, como rectilíneo :

El trabajo total es la suma de los trabajos elementales que corresponden a estos pequeños movimientos.

OBSERVACIÓN. — Cuando, durante un movimiento, la fuerza, constante o no, es perpendicular al movimiento, su trabajo es nulo.

91. Unidades de trabajo. — La fórmula $T = Fe$ define la unidad de trabajo. Si se hace a $F = 1$ con $e = 1$ se tiene $T = 1$; luego la unidad de trabajo es : el trabajo de una fuerza de intensidad igual a la unidad que transporta su punto de aplicación una unidad de longitud en su propia dirección.

Luego en el sistema C. G. S. sería el trabajo de una dinamia que cambia su punto de aplicación 1 centímetro. Esta unidad ha recibido el nombre de *ergamia*, y como es muy pequeña, se emplea como unidad secundaria el *julio*, que vale diez millones de ergamias, o 10^7 ergamias.

La unidad de trabajo del sistema métrico es el *kilogrametro* : es el trabajo de una fuerza de un kilogramo-peso que transporta su punto de aplicación 1 metro en su propia dirección. Es, pues, el trabajo necesario para levantar 1 kilogramo a 1 metro del suelo. El valor del kilogrametro en ergamias se obtiene multiplicando los números 981 000 y 100 que expresan respectivamente en dinas y en centímetros, el kilogramo-peso y el metro. Se ve que

1 kgm. vale 98,400 000 ergamias, (o 9,81 julios).

91. Potencia de una máquina. — Vatio. — Caballo de vapor. — Horse-power. — Una máquina es tanto más potente, cuanto más considerable es el trabajo que desarrolla en un tiempo dado : así, se llama *potencia* de un motor a la *cantidad de trabajo que puede proporcionar en un segundo.*

En el sistema C. G. S. la unidad de potencia es la potencia de una máquina que desarrolla una ergamia por segundo. Esta potencia es extremadamente reducida, por lo cual se emplea una unidad secundaria que es diez millones de veces mayor y que se denomina *vatio*. El vatio es, pues, la *potencia de un motor que efectúa un julio por segundo.*

Se valúa la potencia de las grandes máquinas por medio de múltiplos del vatio, como el *hectovatio* o 100 vatios y el *kilovatio* o 1 000 vatios.

Caballo de vapor. — También se emplea, a menudo, como unidad de potencia, el *caballo de vapor* : es la potencia de una máquina que efectúa 75 kilogrametros por segundo.

1 caballo de vapor equivale a $75 \times 98\ 100\ 000 = 7\ 357\ 500\ 000$ ergamias por segundo, o 735, 750 vatios, esto es, 736 vatios próximamente.

Horse-power. — En Inglaterra, la unidad vulgar de potencia se denomina *horse-power*. Se representa por el símbolo HP y equivale a 75,9 kgm. por segundo.

93. Trabajo de las máquinas. — Conservación del trabajo. — En una máquina, el trabajo de la potencia, o *trabajo motor*, es igual al trabajo de la resistencia o *trabajo resistente* *. De lo que se deduce que, si, por medio de una máquina, se obtiene un cierto efecto, ha sido necesario emplear la misma cantidad de trabajo que si se hubiera producido este efecto directamente.

1º *Caso de las palancas.* — Consideremos por ejemplo, una palanca de primer género (fig. 97), en equilibrio bajo la acción de la potencia P y de la resistencia R. Tendremos la ecuación de equilibrio

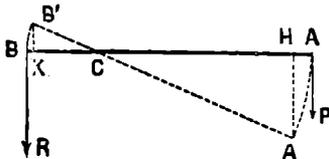


Fig. 97.

$$\frac{R}{P} = \frac{CA}{CB}$$

Si se aumenta sumamente poco la potencia, se produce un movimiento de la palanca; el punto de aplicación A de la potencia cambia de lugar, de A a A', en tanto que el de la resistencia se ha movido de B a B'.

El trabajo de la potencia es $P \times HA'$ y el de la resistencia $R \times KB'$. Estos dos trabajos son iguales. Luego

$$\frac{HA'}{KB'} = \frac{CA}{CB} = \frac{CA}{CB}$$

de donde

$$\frac{HA'}{KB'} = \frac{R}{P} \quad \text{y} \quad P \times HA' = R \times KB'$$

2º *Caso de la polea.* — Aquí, la potencia es igual a la resistencia, cuando hay equilibrio; y, cuando se produce un movimiento cualquiera, los puntos de aplicación de la potencia y de la resistencia se mueven igualmente : el trabajo motor, es, pues, también, igual al trabajo resistente.

3º *Caso del torno.* — Suponemos que se mira el torno haciendo frente al extremo del cilindro y al círculo descrito por el manubrio. Cuando este último se mueve de M a M' (fig. 37), el punto A, a que se haya atado la cuerda, se traslada a A' : se enrolla una

* Esto no es rigurosamente exacto, como luego veremos (99) sino cuando el movimiento de la máquina es *uniforme*.

longitud de cuerda igual al arco AA', y por lo tanto, el fardo se eleva una altura igual a CC'.

La ecuación de equilibrio es :

$$\frac{R}{P} = \frac{OM}{OA} = \frac{\text{arco } MM'}{\text{arco } AA'}$$

de donde

$$P \times \text{arco } MM' = R \times \text{arco } AA'.$$

En este caso, como la fuerza P ha permanecido siempre en la dirección del movimiento, el trabajo de esta fuerza es $P \times \text{arco } MM'$. Asimismo, el trabajo de la resistencia es $R \times CC'$, o $R \times \text{arco } AA'$. Estos dos trabajos son iguales, según la relación precedente.

4º *Caso de un plano inclinado.* — Si se traslada el cuerpo de A a B (fig. 38), por la acción de la fuerza F , = F , ésta cumple un trabajo $F \times AB$. Pero, el peso P, que es la resistencia, se eleva una altura BC; el trabajo resistente es, pues, $P \times BC$.

Luego

$$\frac{F}{P} = \frac{BC}{AB}$$

de donde

$$F \times AB = P \times BC.$$

El trabajo motor es, también, igual al trabajo resistente.

Conclusión. — Por estos ejemplos, se ve claramente que, en toda máquina en acción no hay multiplicación, sino sólo *conservación del trabajo*. De todos modos, el trabajo se ha vuelto más fácil; a veces, hasta hubiera sido imposible efectuarlo sin la máquina; de donde se deduce su utilidad y su empleo.

94. **Resistencias pasivas. — Frotamientos.** — Prácticamente, en las máquinas, el trabajo motor debe ser siempre mayor que el resistente. Esto depende de que hay *frotamientos, choques, vibraciones*, que se traducen por fuerzas resistentes, llamadas *resistencias pasivas*. Estas resistencias absorben una parte del trabajo motor, que de este modo se transforma generalmente en calor.

1º *Frotamiento de deslizamiento.* — Supongamos un cuerpo pesado, descansando sobre una superficie plana y horizontal. Si las superficies en contacto estuvieran bien pulimentadas, bastaría aplicar horizontalmente una fuerza pequeñísima para mover el cuerpo; pero nunca sucede así : se necesitará, para producir el movimiento, una fuerza horizontal F, que mide el frotamiento. El efecto de éste podría ser reemplazado por el de una fuerza igual y directamente opuesta a F, llamada *fuerza de frotamiento*.

Ya se ha demostrado que la fuerza de frotamiento es, para superficies frotantes dadas, proporcional al peso del cuerpo que hay que poner en movimiento. La relación de la intensidad de la fuerza de frotamiento con el peso del cuerpo se denomina *coeficiente de frotamiento*, el cual es independiente de la magnitud de las superficies frotantes, pero que depende mucho de la naturaleza de esos cuerpos.

He aquí algunos coeficientes de frotamiento :

Madera sobre madera, en seco, fibras paralelas	0,47
Madera sobre madera, superficies con grasa.	0,07
Metales sobre metales, en seco	0,19
Metales sobre metales, con grasa	0,10

Para mover un fardo en un plano horizontal, hay que realizar un trabajo. Del mismo modo, en el movimiento de un cuerpo sobre un

plano inclinado, la fuerza motriz deberá ser siempre mayor que la fuerza F_1 que hemos calculado (36) : luego el trabajo motor será mayor que el resistente, el cual mide el *trabajo útil* producido.

En todas las máquinas en acción hay frotamientos; por consiguiente el trabajo útil será siempre menor que el trabajo motor efectuado. Para disminuir los frotamientos hay que lubricar con aceite o grasa las superficies que frotan.

2º *Frotamiento de rotación.* — Cuando un cuerpo cilíndrico rueda sobre una superficie plana, para ponerle en movimiento es preciso aplicarle cierta fuerza, que es una nueva especie de frotamiento que ha recibido el nombre de *frotamiento de rotación*. El frotamiento de rotación es mucho menor que el de deslizamiento. Luego hay gran ventaja en substituir éste por aquél, cuando se puede, tal como en los coches, bicicletas, etc.

95. **Rendimiento de una máquina.** — Se llama rendimiento de una máquina a la fracción del trabajo motor utilizado; es pues *la relación del trabajo útil al trabajo motor*. Siempre es un número inferior a la unidad.

Por ejemplo, una máquina que produce un trabajo útil de 75 kilográmetros, cuando el trabajo motor ha sido de 100 kilográmetros, da un rendimiento de 75 por 100, o 0,75.

Se aumenta el rendimiento de una máquina, disminuyendo todo lo posible los frotamientos y choques.

ENERGÍA. — CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

96. **Fuerza viva. — Teorema de las fuerzas vivas.** — Cuando un punto material, de masa m , se halla en movimiento y posee la velocidad v , se llama *fuerza viva* del punto material al producto mv^2 de su masa por el cuadrado de su velocidad.

La *fuerza viva de un sólido* es la suma Σmv^2 de las fuerzas vivas de los puntos materiales que lo constituyen.

1º *Caso de un movimiento de traslación.* — En este caso, la velocidad de todos los puntos del cuerpo tiene el mismo valor v , y la fuerza viva total es $v^2\Sigma m$ o Mv^2 , si designamos por M la masa del cuerpo.

2º *Caso de un movimiento de rotación. — Momento de inercia.* — Sean m , la masa de uno de los puntos materiales que constituyen el sólido y r su distancia al eje : su velocidad es, pues, ωr y su fuerza viva $m\omega^2 r^2$. La fuerza viva total $\Sigma m v^2$ se expresa.

$$\Sigma m \omega^2 r^2 \quad \text{o bien} \quad \omega^2 \Sigma m r^2;$$

puesto que la velocidad angular ω es la misma para todos los puntos del cuerpo.

La expresión $\Sigma m r^2$ se llama *momento de inercia* del cuerpo con respecto al eje.

Si el cuerpo tiene forma geométrica, se puede calcular su momento de inercia respecto de un eje cualquiera.

Teorema de las fuerzas vivas. — Si dos fuerzas actúan sobre un cuerpo, efectuando un trabajo motor, la fuerza viva del cuerpo aumenta. Así : si un proyectil colocado en el alma de un cañón se halla en reposo, su fuerza viva es nula. En el momento de la detonación, el empuje ejercido por los gases que proceden de la combustión de la

pólvora dispara el proyectil y efectúa un trabajo motor. El proyectil sale de la boca de fuego con cierta velocidad V , y, por tanto, con cierta fuerza viva MV^2 .

Recíprocamente, cuando las fuerzas que actúan sobre un cuerpo en movimiento cumplen un trabajo resistente, la fuerza viva disminuye. Así, el proyectil, después de salir de la boca del cañón, sufre, por la resistencia del aire, un trabajo negativo que disminuye su velocidad y, por consecuencia, su fuerza viva*. Y si el proyectil llega a contacto con un obstáculo, una masa de tierra, por ejemplo, penetrará en ella. La resistencia del obstáculo efectúa un trabajo negativo que anula rápidamente la fuerza del proyectil.

Estas diversas transformaciones se regulan por el teorema siguiente. Llamado *teorema de las fuerzas vivas* :

La suma algébrica de los trabajos de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo sólido, en un intervalo de tiempo dado, es igual a la semi-variación de la fuerza viva del cuerpo durante el tiempo que se considera.

Demostración. — No podemos dar aquí demostración general de este teorema, que es uno de las más importantes de la mecánica. Nos limitaremos a examinar algunos casos particulares.

1º *Caso de un cuerpo que cae sin velocidad inicial.* — Cuando el cuerpo, de masa m , llega a M (fig. 98), a una distancia h , del origen A , adquiere la velocidad

$$v = \sqrt{2gh}$$

y, por consiguiente, una fuerza viva

$$mv^2 = 2mgh.$$

Esta es la variación de la fuerza viva, en el movimiento de A a M ; puesto que en A la velocidad, y por tanto la fuerza viva, eran nulas.

Pero, durante este movimiento, el peso del cuerpo mg , cumple un trabajo

$$T = mgh;$$

luego : $T = \frac{1}{2}mv^2$.

2º *Caso de un cuerpo lanzado de arriba abajo.* — Supongamos que al partir de A (fig. 98) se haya comunicado al cuerpo una velocidad inicial v_0 dirigida hacia abajo, y, por consiguiente, una fuerza viva inicial mv_0^2 . El cuerpo llega, en el tiempo t y en un punto M , a una distancia h de A y con una velocidad v . Tenemos :

$$h = v_0t + \frac{gt^2}{2}, \quad v = v_0 + gt.$$

La variación de fuerza viva es

$$mv^2 - mv_0^2 = 2mv_0gt + mg^2t^2.$$

El trabajo del peso es

$$T = mgh = mgv_0t + \frac{1}{2}mg^2t^2.$$

Luego :

$$T = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2.$$

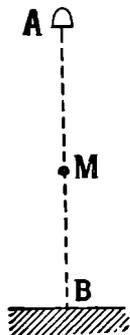


Fig. 98.



Fig. 99.

Lo cual está de acuerdo con el teorema de las fuerzas vivas.

3º *Caso de un punto material lanzado de abajo arriba.* — Sea un cuerpo de masa m lanzado verticalmente de abajo a arriba de un punto A (fig. 99), con una velocidad ini-

* Hacemos abstracción del efecto de la gravedad, que efectúa un trabajo positivo. Pero este trabajo positivo y el aumento de fuerza viva que resultan son pequeños comparados con la fuerza viva inicial del proyectil.

cial v_0 . Al salir, tiene por lo tanto una fuerza viva mv_0^2 . Cuando llega al punto M, al cabo del tiempo t , su velocidad v y el espacio h que ha recorrido son, respectivamente ;

$$v = v_0 - gt, \quad \text{y} \quad h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}.$$

Luego la variación de su fuerza viva es :

$$mv^2 - mv_0^2 = gt^2 - 2v_0gt.$$

En cuanto al trabajo de la gravedad, debe éste escribirse $-mgh$, porque es un trabajo negativo. Luego, tendremos :

$$T = -mgv_0t + \frac{mg^2t^2}{2}.$$

o

$$T = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2.$$

97. Energía cinética o actual. — *En general, se dice que un cuerpo o un sistema de cuerpos posee energía cuando es capaz de cumplir un trabajo mecánico :*

Un cuerpo en movimiento puede cumplir un trabajo contra fuerzas resistentes, si se detiene o si, simplemente, disminuye su velocidad. Por lo tanto, posee energía.

La energía que posee un cuerpo por el hecho de hallarse en movimiento se llama *energía cinética* o *energía actual*.

La energía cinética de un punto material se mide por su semifuerza viva o $\frac{1}{2}mv^2$, porque ésta es la expresión del trabajo que puede efectuar el cuerpo cuando su velocidad se anula.

En un cuerpo o un sistema de cuerpos, animados de una velocidad cualquiera, la energía cinética se mide por la mitad $\frac{1}{2} \Sigma mv^2$ de la fuerza viva total.

Transformación del trabajo en energía cinética y transformación inversa. — Volvamos al ejemplo del proyectil lanzado por el cañón. Mientras aquél se encuentra en el alma del cañón, recibe el trabajo de la presión del gas y adquiere, según el teorema de las fuerzas vivas, una energía cinética igual a este trabajo. Se dice que, el trabajo se ha transformado en energía cinética. Inversamente, cuando el proyectil sufre la resistencia del aire o de un obstáculo, no puede volver al reposo sino después de haber cedido una cantidad de trabajo que, según el teorema de las fuerzas vivas, es igual a su energía cinética. Se ve, pues, que la energía cinética se ha transformado otra vez en trabajo.

Del mismo modo, si un cuerpo cae, su velocidad aumenta sin cesar : el trabajo que la gravedad ejerce sobre él, se transforma en energía cinética. Pero, cuando el cuerpo llegue al suelo, es capaz de producir una cantidad de trabajo igual, precisamente, a su energía cinética.

98. Martillo. — El martillo ofrece un ejemplo interesante de la transformación del trabajo en energía cinética y de la transformación inversa.

Supongamos un martillo que sirve para introducir un clavo en un trozo de madera.

Cuando se le lanza, la mano le comunica una velocidad v . Al llegar

contra el clavo, el martillo tropieza con la resistencia de la madera. Llamemos F al valor medio de esta resistencia. El clavo penetra a una profundidad e . El trabajo de la resistencia es Fe , y debe ser igual a la semifuerza viva del martillo. Por consiguiente, tendremos :

$$Fe = \frac{1}{2}Mv^2;$$

de donde

$$e = \frac{Mv^2}{2F} \quad \text{y} \quad F = \frac{Mv^2}{2e}.$$

En consecuencia, sea cual fuere la resistencia F opuesta por la madera, el clavo ha de penetrar; pero la cantidad e que avanzará, será tanto más pequeña, cuanto mayor sea la resistencia F .

99. **Variaciones de la velocidad de una máquina. — Volantes. —** Cuando una máquina se halla en acción, en general, el trabajo que le comunica el agente motor y el trabajo resistente que aquélla debe vencer varían sin cesar. Supongamos que, en un espacio determinado de tiempo, el trabajo motor sea T_m y el resistente, T_r . Si T_m es superior a T_r , la máquina se acelerará, de tal manera que el aumento de la fuerza viva total de sus distintas piezas sea $T_m - T_r$. Si, por el contrario, T_m es inferior a T_r , la máquina disminuirá de velocidad.

A fin de que la máquina no sufra variaciones de velocidad demasiado bruscas, se la provee de un volante. Este es una gran rueda muy pesada y calzada en el árbol de la máquina.

Durante los periodos en que el trabajo motor es superior al trabajo resistente, el movimiento de la máquina se acelera; pero, como la masa del volante es muy grande, la variación de la fuerza viva no produce más que una ligera variación de velocidad. Inversamente, durante los periodos en que el trabajo resistente es superior al trabajo motor, el movimiento se retarda; pero el volante puede restituir una cantidad importante de trabajo, sin que su velocidad disminuya mucho. Luego, el efecto del volante es regularizar el funcionamiento de la máquina.

Cálculo del efecto de un volante. — Para simplificar, supongamos que la masa M del volante se halle toda en su circunferencia, y llamemos R al radio de ésta.

Hagamos abstracción de las fuerzas vivas de los órganos de la máquina que no sean las del volante. Sean T_m y T_r el trabajo motor y el trabajo resistente durante un cierto periodo. La variación de la fuerza viva durante este mismo periodo, nos la da la ecuación

$$T_m - T_r = \frac{1}{2}MV^2 - \frac{1}{2}MV_0^2.$$

En que V_0 y V representan las velocidades de un punto de la circunferencia del volante, al principio y al fin del intervalo de tiempo considerado. Si ω y ω_0 son las velocidades angulares del volante en los mismos momentos, tendremos :

$$V = \omega R \quad \text{y} \quad V_0 = \omega_0 R.$$

y por tanto

$$T_m - T_r = \frac{1}{2}MR^2(\omega^2 - \omega_0^2).$$

De donde

$$\omega - \omega_0 = \frac{T_m - T_r}{\frac{\omega + \omega_0}{2}MR^2}.$$

Esta expresión demuestra que ω será tanto menos diferente de ω_0 cuanto mayores sean M y R .

Pero, como R entra al cuadrado en la fórmula, se ve que se gana más aumentando el radio R que aumentando la masa M del volante.

Además, para disminuir la variación de la velocidad, el efecto del volante es tanto más grande cuanto mayor sea, en el intervalo de tiempo que se considera, la velocidad angular media $\frac{\omega + \omega_0}{2}$. De aquí se deduce, que un pequeño volante que gire muy rápidamente puede producir el mismo efecto que uno grande que gire lentamente.

100. Energía potencial. — Supongamos que se levanta una piedra de masa M sobre un apoyo a la altura h (fig. 98).

El sistema constituido por la piedra y la tierra no está, desde el punto de vista de la energía, en las mismas condiciones que cuando la piedra reposaba en el suelo. En efecto, supongamos que se engancha la piedra a un hilo que pase por una polea, suspendiendo del otro extremo un peso más pequeño que el de la piedra. Si se suprime el apoyo, la piedra descenderá y, así que haya llegado al suelo, habrá efectuado un trabajo, al levantar la masa que se halla en el otro extremo del hilo.

Se concibe que, si no hubiera ningún frotamiento, el peso levantado de ese modo, a pesar de ser menor que el de la piedra, puede diferenciarse del de ésta tan poco como se quiera. Se ve, pues, que la piedra, bajando hasta el suelo, produciría exactamente el trabajo empleado para elevarla a la altura h .

Este fenómeno se expresa diciendo que el sistema formado por la piedra y la tierra, posee mayor *energía potencial* cuando la piedra se halla a la altura h , que cuando descansa en el suelo. Este exceso de energía potencial se mide por el trabajo que puede dar el sistema cuando vuelve a su estado inicial. Este trabajo es $T = mgh$.

OBSERVACIONES. — 1ª Nótese que no hablamos sólo de la piedra; sino del sistema formado por ésta y la tierra. En efecto, la piedra, por sí sola, no posee energía potencial; porque, si la tierra no la atrajese, ella no sería capaz de dar trabajo al pasar de la altura h al nivel del suelo. Por otra parte, tampoco hubiera habido que gastar trabajo para elevarla.

2ª Cuando la piedra se halla en el suelo, la energía del sistema que forma con la tierra no es nula. En efecto, si bajo la piedra existiese un pozo, se podría, haciéndola bajar hasta el fondo del pozo, recoger otra nueva cantidad de trabajo. La energía potencial del sistema sólo sería nula, si la piedra se hallase en el centro de la tierra.

Otros ejemplos de energía potencial. — 1º Un recipiente lleno de agua, colocado a cierta altura del suelo, representa una provisión de energía potencial. En efecto, cuando esta agua caiga a un nivel más bajo, podrá poner en movimiento una máquina hidráulica (rueda o turbina*) y producir, de esta forma, un trabajo; el cual corresponde, por lo menos en parte, a la disminución de la energía potencial.

2º Del mismo modo, al estirar un muelle, se le comunica energía

* G. MANEUVRIER, *Tratado elemental de mecánica racional y aplicada*.

potencial, porque éste, al comprimirse luego, puede efectuar un trabajo que es equivalente al que se ha necesitado para estirarlo.

101. **Transformaciones mutuas de la energía cinética y de la energía potencial.** — La energía cinética y la energía potencial pueden transformarse mutuamente una en otra.

Transformación de la energía potencial en energía cinética. — Supongamos una piedra sostenida en un apoyo en A (fig. 98) a la altura h . El sistema formado por la piedra y la tierra posee una energía mgh a más de la energía E_0 que poseía cuando la piedra estaba en el suelo.

Dejemos, ahora, que la piedra caiga al suelo. La energía potencial del sistema disminuye; pero la energía cinética de la piedra aumenta. Y, cuando la piedra esté en M, a una altura x del suelo, tendrá una velocidad

$$v = \sqrt{2g(h-x)},$$

y, por consiguiente, una energía cinética

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = mg(h-x).$$

Pero el sistema de la piedra y la tierra tiene también la energía potencial $E_0 + mgx = E'$. Así es, que tendremos :

$$E + E' = E_0 + mg(h-x) + mgx = E_0 + mgh.$$

La suma de la energía cinética y la energía potencial ha quedado, pues, invariable. En efecto, en A, la energía cinética era nula y la energía potencial tenía un valor $E_0 + mgh$.

Una vez en el suelo, en B, posee, la piedra, una velocidad $v = \sqrt{2gh}$ y una energía cinética $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$. Pero, entonces, la energía potencial es E_0 y la energía total $E_0 + mgh$. Luego esta energía potencial se ha transformado por completo, durante la caída, en energía cinética.

Transformación inversa. — Supongamos que, desde un punto A del suelo (fig. 99), se lanza, verticalmente y de abajo arriba, una piedra de masa m , con una velocidad inicial v_0 . En este caso, la piedra posee una energía potencial E_0 y una energía cinética $\frac{1}{2}mv_0^2$. Luego la energía inicial es

$$E_0 + \frac{1}{2}mv_0^2.$$

Supongamos que, en un tiempo t , la piedra llega á un punto M, a la altura x del suelo. Tendremos :

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = -mgx.$$

De donde

$$\frac{1}{2}mv^2 + mgx + E_0 = E_0 + \frac{1}{2}mv_0^2.$$

Pero $\frac{1}{2}mv^2$ es la energía cinética E , en M, y $mgx + E_0$ es la energía potencial E' , en el mismo punto. Luego

$$E + E' = E_0 + \frac{1}{2}mv_0^2.$$

Durante todo el trayecto, la suma de la energía potencial y de la energía cinética permanece constante. Sabemos, también, que la piedra se detiene a la altura $h = \frac{v_0^2}{2g}$ (85). Por consiguiente, tendrá una energía cinética nula y una energía potencial

$$E_0 + mgh = E_0 + mg \frac{v_0^2}{2g} = E_0 + \frac{1}{2}mv_0^2.$$

De donde resulta que la energía cinética se transforma enteramente en energía potencial.

102. **Otras formas de energía.** — **Principio de la conservación de la energía.** — Ocurre, a menudo, que cierta cantidad de trabajo mecánico desaparece sin que aparezca una cantidad equivalente de trabajo o de otra forma de energía mecánica; pero, entonces, se produce otro fenó-

meno : calorífico, luminoso, eléctrico, magnético, químico, etc. Por ejemplo, puede gastarse trabajo para mover dos engranajes que frotan sin que su velocidad aumente. Asimismo, una bala de plomo puede aplastarse contra un obstáculo consistente, sin moverlo. En ambos casos, se demuestra que hay *desarrollo de calor*, y que la cantidad de calor producida es *proporcional* al trabajo desaparecido (361). Este calor puede ser considerado como equivalente a trabajo : es una nueva forma de la energía, que se llama *energía calorífica*. Recíprocamente, el calor puede transformarse en trabajo (364); que es lo que sucede en las máquinas de vapor.

Igualmente, en el fenómeno de la radiación calorífica o de la radiación luminosa (608), encontramos un nuevo agente capaz de transformarse en calor equivalente a un trabajo dado : es la *energía de la radiación*.

En el estudio de la electricidad, veremos también aparecer otra forma de energía, que llamaremos *energía eléctrica*.

Finalmente, los fenómenos químicos nos ofrecen ejemplos de otra forma de energía denominada *energía química*. Consideremos, por ejemplo, un cuerpo explosivo, tal como el cloruro de nitrógeno. Cuando se provoque su descomposición, ésta producirá efectos caloríficos o mecánicos equivalentes a cierto trabajo. Se deduce, que el cloruro de nitrógeno contenía, en el estado potencial, determinada cantidad de energía que no posee la mezcla de sus elementos. Inversamente, para formar cloruro de nitrógeno partiendo de sus elementos, habrá que proporcionarle una cantidad de energía igual a la que el cuerpo desarrolla en el momento de su descomposición : a esto se llama un *compuesto endotérmico*, y se forma con *absorción de calor*. Por el contrario, un cuerpo de formación *exotérmica*, como el agua, representa un sistema que posee menos energía que la mezcla de sus elementos.

En todo fenómeno físico o químico, veremos producirse variaciones de una o varias formas de energía y podemos imaginar que se miden estas variaciones de energía por la cantidad de trabajo mecánico que les es equivalente. Además, se comprueba también que si, por una parte, se ve aparecer trabajo, o energía, bajo cualquiera forma, es que, por otra parte, ha desaparecido una cantidad equivalente de trabajo o de energía.

Luego se puede enunciar la proposición siguiente conocida con el nombre de *Principio de la conservación de la energía*.

En un sistema aislado (es decir, en un sistema que no recibe del exterior trabajo ni energía de ninguna clase, y que tampoco los produce) cualesquiera que sean los fenómenos que se produzcan, la cantidad total de energía es constante; o, en otros términos, la suma algébrica de las variaciones de la energía, bajo sus diferentes formas, es nula.

Este principio es de suma importancia, tanto desde el punto de vista teórico como para las aplicaciones de la física.

CAPÍTULO VIII

PÉNDULO. — MEDIDA DE LA INTENSIDAD DE LA GRAVEDAD. — MEDIDA DEL TIEMPO

103. **Péndulo.** — **Movimiento oscilatorio.** — 1° *Péndulo compuesto y péndulo simple.* — Todo cuerpo grave que se mueve, ya al rededor de un punto fijo llamado *centro de suspensión*, ya al rededor de un eje fijo horizontal llamado *eje de suspensión*, constituye un *péndulo compuesto*.

Una plomada es el ejemplo más sencillo de la primera disposición. Vamos a considerar sólo el caso en que el péndulo se mueve en un solo plano vertical; entonces se puede decir que es móvil al rededor de un eje horizontal perpendicular a este plano. El balancín de reloj de la figura 110 representa el tipo de péndulos más usados. El eje de suspensión es, ya la arista viva o *cuchillo* (fig. 104), ya una lámina de acero, delgada y flexible (fig. 110).

Cuanto al *péndulo simple* es una concepción matemática absolutamente irrealizable en la práctica, puesto que se le define : un *punto material pesado*, suspendido, mediante un hilo *inextensible y sin peso*, de un punto fijo alrededor del cual puede moverse libremente.

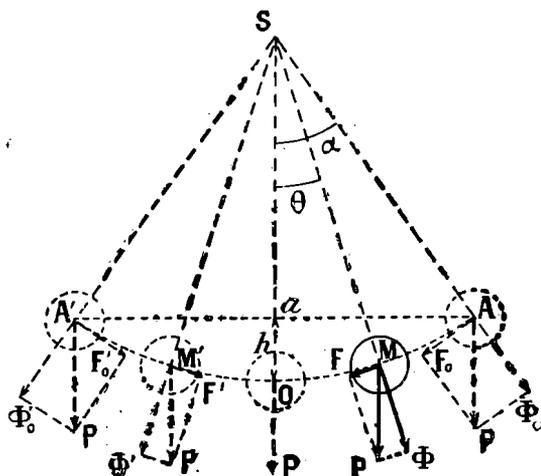


Fig. 100.

2° *Movimiento oscilatorio.* —

Todo péndulo está en equilibrio cuando la vertical de su centro de gravedad encuentra el eje de suspensión.

Tomemos, como plano de figura (fig. 100), un plano vertical que pase por el centro de gravedad O del péndulo y perpendicular al eje de suspensión S. Si separamos el péndulo de su posición de equilibrio, su centro de gravedad se moverá en el arco de círculo AOA'.

Llevemos el centro de gravedad a A de manera que la derecha SA forme un ángulo α con su posición inicial. Si P representa el peso del péndulo y h la altura vertical a la que hemos levantado el centro de gravedad, hemos ejecutado un trabajo contra la gravedad, trabajo igual a Ph . También hemos dado un aumento de Ph a la energía del sistema formado por la tierra y el péndulo. Como la dirección del peso P no pasa ya por el punto fijo S, este peso puede descomponerse en dos fuerzas : una Φ_0 , dirigida por la prolongación de SA, y la otra F_0 ,

dirigida por la tangente al arco OA. La componente Φ_0 queda anulada por la resistencia del punto fijo; pero la componente tangencial actúa para arrastrar el péndulo siguiendo el arco AO y para volverlo a su posición inicial de equilibrio. Esta componente queda completamente anulada tan pronto como el péndulo llega de nuevo a su posición inicial.

Pero no se para ahí, porque, al pasar de la posición SA a la posición SO, ha adquirido una energía cinética igual al trabajo motor de la gravedad durante la caída, esto es, a Ph . Toda la energía comunicada está entonces transformada en energía cinética.

Pero, a lo largo del arco OA', el peso P obra como una fuerza retardatriz y quita poco a poco al péndulo la energía cinética comunicada durante el descenso. Llegará, pues, un momento en que la fuerza viva adquirida será completamente anulada por el trabajo resistente de la gravedad: entonces toda la energía estará de nuevo en forma de energía potencial. El péndulo dejará de subir, y volverá a caer inmediatamente hacia el punto O que dejará atrás otra vez, en virtud de su velocidad adquirida. Volverá a subir hacia el punto A hasta que su fuerza viva quede destruida, y así sucesivamente.

El movimiento continuará del mismo modo, por una serie de *periodos* análogos que constituyen el *movimiento oscilatorio*.

Si no hubiera ninguna pérdida de energía, el péndulo oscilaría indefinidamente entre A y A'. Pero la resistencia del aire, el frotamiento del soporte y la tracción de éste por el péndulo absorben energía. Resulta, pues, que los puntos extremos A y A' se van reduciendo cada vez hasta que el movimiento acaba por pararse. Entonces se dice que *el movimiento oscilatorio se amortigua*.

Llámase *oscilación simple* el paso de una posición extrema del péndulo a otra posición extrema. El *período* u *oscilación completa* se compone de la sucesión de dos oscilaciones simples, de sentidos opuestos. El ángulo OSA = α que mide el movimiento angular de cada punto del péndulo, a partir de la posición de equilibrio, se denomina *amplitud de la oscilación*.

Observación. — Si la gravedad actuara sola, el punto de parada A, sería exactamente simétrico del de partida A. En efecto, la fuerza viva que el péndulo ha adquirido al caer de la altura h no podría ser anonadada sino a consecuencia de una ascensión igual al descenso. Análogamente, el péndulo se elevaría hasta el punto A, en su movimiento de regreso, y el período oscilatorio estaría constituido por las dos oscilaciones simples, absolutamente idénticas. Por consiguiente, la amplitud permanecería invariable y el movimiento del péndulo duraría indefinidamente una vez comenzado; la cantidad de energía permanecería constante. Pero tres causas extrañas a la gravedad concurren sin descanso a quitar energía al sistema; a saber: 1° la resistencia del aire; 2° el rozamiento más o menos atenuado, pero siempre sensible, que se produce inevitablemente en el eje de suspensión; 3° el arrastre del soporte por el péndulo.

104. Leyes de las oscilaciones de un péndulo cualquiera. — El movimiento de un péndulo cualquiera está sometido a ciertas leyes establecidas por la experimentación.

1° LEY DEL ISOCRONISMO DE LAS PEQUEÑAS OSCILACIONES. — *La dura-*

ción de las oscilaciones de un péndulo es independiente de su amplitud, con tal que ésta sea pequeña. También se dice : Las pequeñas oscilaciones de un péndulo son isócronas.

Para establecer esta ley, se separa un péndulo cualquiera de su posición de equilibrio y se le abandona a sí mismo. Se cuentan sucesivamente varias series de 100 oscilaciones y se mide su duración. La amplitud media de estas oscilaciones decrece poco a poco. Comparando su duración media sucesiva, se ve que esta duración disminuye, al mismo tiempo que las amplitudes medias, mientras estas son pequeñas; pero que dicha duración adquiere un valor constante, en cuanto las amplitudes no excedan de 2 o 3 grados *.

2º LEY DEL DECREMENTO DE LAS AMPLITUDES. — *La amplitud de las oscilaciones decrece en progresión geométrica, cuando su número crece en progresión aritmética.*

Esta ley fué descubierta por Borda. Para establecerla, daba éste a su péndulo una amplitud muy pequeña, que no excedía de un tercio de grado. Después de 1800 oscilaciones, reduciase poco más o menos, a los dos tercios de su valor. Biot confirmó la ley de Borda para amplitudes más grandes, superiores a 1º.

105. Medida de la duración de oscilación de un péndulo. — Método de las coincidencias. — La ley del isocronismo de las pequeñas oscilaciones permite medir la duración de la oscilación de un péndulo con gran exactitud. Para esto, se mide la duración θ de un gran número de oscilaciones, 1 000, por ejemplo. La duración de una sola oscilación es $t = \frac{\theta}{1\,000}$. Operando de este modo, se comete indudablemente cierto error acerca del valor de θ ; error igual al que resultaría de medir la duración de una sola oscilación, sólo que se encuentra repartido entre 1 000 oscilaciones; es decir, que el error cometido en t es 1 000 veces menor.

Método de las coincidencias. — Para no tener que contar un gran número de oscilaciones, se emplea el método de las coincidencias imaginado por Mairan.

Dispónese el péndulo delante del balancín de un reloj de segundos, de tal manera que : 1º durante la marcha de los dos péndulos, sus planos de oscilación sean paralelos; — 2º en estado de equilibrio las verticales de sus centros de gravedad se encuentren en un mismo plano Oz (fig. 101) perpendicular al plano de oscilación.

Supongamos los dos péndulos reducidos a estas dos verticales; dicese que se produce una *coincidencia*, cuando ambos péndulos pasan al mismo tiempo por el plano Oz yendo en el mismo sentido.

Supongamos que se observan sus movimientos simultáneos a partir del instante de una coincidencia, y que el péndulo P_0 ande un poco más de prisa que el balancín. Cuando éste haya vuelto a su posición de equilibrio B , yendo en la misma dirección de la flecha, el péndulo le ha pasado y ha venido a P_1 ; así toma poco a poco

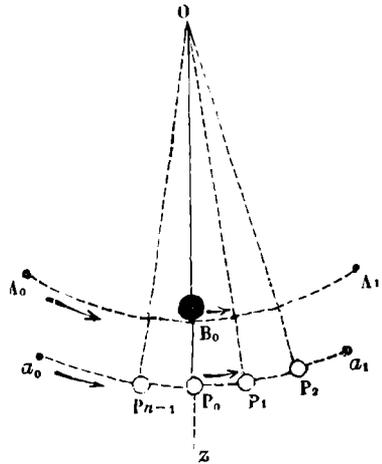


Fig. 101.

* Para medir la duración de las oscilaciones, se emplea un reloj o un cronómetro. Pero estos instrumentos están a su vez regulados por péndulos (116), en los cuales se admite el isocronismo de sus oscilaciones. De todos modos, en esta manera de operar, no hay petición de principio; porque los péndulos de los relojes y cronómetros efectúan oscilaciones que, teniendo amplitud constante, son necesariamente isócronas.

ventaja sobre el balancín y cuando haya hecho una oscilación doble o dos oscilaciones simples más que él, se producirá una nueva coincidencia.

Sean entonces n y N los números respectivos de oscilaciones simples del péndulo y del balancín en el intervalo de dos coincidencias, se tiene ; $n = N + 2$.

Pero N es el número de segundos marcados por el reloj en el intervalo de dos coincidencias. Luego la duración de una oscilación simple del péndulo es $t = \frac{N}{N+2}$.

OBSERVACIONES. — 1º Si el péndulo tuviera un retraso en vez de un adelanto sobre el balancín la fórmula final vendría a ser.

$$n = N - 2 \quad \text{y} \quad t = \frac{N}{N-2}.$$

2º Se comprende sin dificultad que el observador no necesite estar junto al aparato durante todo el intervalo de tiempo que separa dos coincidencias. El conocimiento aproximado de la duración de oscilación del péndulo le permite prever la época de la coincidencia ; basta con que observe un poco antes.

106. Leyes del péndulo simple. — No se pueden establecer por medio de experimentos las leyes del péndulo simple, puesto que es irrealizable; sólo se han obtenido por la teoría (107). Pero se puede construir, con una bolita pesada suspendida de un hilo largo y fino, un péndulo compuesto que se asemeje mucho al péndulo simple y que sirva para verificar aproximadamente las leyes teóricas.

1ª LEYES DE LAS LONGITUDES. — *La duración de las oscilaciones de pequeña amplitud de un péndulo simple es proporcional a la raíz cuadrada de la longitud del péndulo.*

Por ejemplo, la duración de oscilación de un péndulo simple se hace 2, 3, 4 veces más grande cuando su longitud es 4, 9, 16 veces mayor.

Verificación. — Se construye un péndulo por medio de una bolita suspendida de un hilo largo y fino; se toma como longitud del péndulo la distancia del punto de suspensión al centro de la bolita. Se repiten varios experimentos sucesivos dando al hilo diversas longitudes y midiendo cada vez la duración de oscilación : sean l, l', l'' las longitudes y t, t', t'' las duraciones de oscilación correspondientes. Estableciendo las relaciones $\frac{t}{\sqrt{l}}, \frac{t'}{\sqrt{l'}}, \frac{t''}{\sqrt{l''}}$, se ve que son iguales casi a los errores de experimento.

2ª LEY DE LAS MASAS. — *La duración de oscilación de un péndulo simple, formado por una sustancia determinada; es independiente de la masa del punto grave.*

En efecto, si tomamos varias esferillas de plomo, pero de masas diferentes, y las suspendemos de hilos, constituyendo péndulos simples de la misma longitud, las distintas duraciones de las oscilaciones de estos péndulos son iguales*.

3ª LEY DE LAS SUSTANCIAS. — *La duración de oscilación de un péndulo simple es independiente de su sustancia.*

* No es posible formar péndulos que tengan exactamente la misma longitud. Pero, si se toma péndulos de masas diferentes y de longitudes $l, l', l''...$, basta, para establecer la ley, que entre estas longitudes y las duraciones $t, t', t''...$, de oscilación, haya la relación $\frac{t}{\sqrt{l}} = \frac{t'}{\sqrt{l'}} = \frac{t''}{\sqrt{l''}}$, como en el caso en que las masas eran iguales. Esta observación se aplica también al estudio de la 3ª ley.

Para establecer esta ley, basta formar péndulos simples de igual longitud con esferas de sustancias diferentes, como, por ejemplo, plomo, hierro, platino, marfil, etc., y se verá que la duración de las oscilaciones de estos péndulos es la misma.

107. Teoría del péndulo simple. — Movimiento pendular. — Fórmula del péndulo. — *Movimiento oscilatorio simple.* — Sea un punto M (fig. 102) móvil sobre una recta. Se llama *elongación* de este punto, su distancia OM a un punto O, tomado sobre la recta, y se cuenta esta elongación positivamente en el sentido de la flecha. Se dice que el punto M está animado de un movimiento oscilatorio simple, si su elongación s está representada, en función del tiempo, por la ecuación.

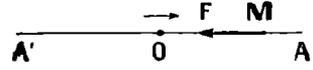


Fig. 102.

$$s = a \operatorname{sen.} 2\pi \frac{t}{T},$$

siendo a y T dos cantidades constantes. Se ve que, cuando el tiempo es cero, $s = 0$, el móvil se halla en O. En el tiempo $\frac{T}{4}$, se tiene $s = a$: el móvil está en A, a una distancia $OA = a$ del punto O. En el tiempo $\frac{T}{2}$, se tiene, otra vez, $s = 0$: el móvil vuelve al punto O. En el tiempo $\frac{3T}{4}$, tenemos $s = -a$: el móvil se halla en A', simétrico de A con relación a O. Finalmente, en el tiempo $t = T$, so tiene también $s = 0$, y el móvil pasa entonces al punto O caminando en el mismo sentido que en el tiempo cero.

La distancia $OA = a$ so llama *amplitud* del movimiento.

La cantidad T so llama *periodo* del movimiento oscilatorio. Esta mide el tiempo que separa dos pasajes sucesivos del móvil al mismo punto, M por ejemplo, *dirigiéndose en el mismo sentido*. En efecto, se ve que en el tiempo $t + T$ la elongación tiene por valor

$$s' = a \operatorname{sen.} 2\pi \left(\frac{t + T}{T} \right) = a \operatorname{sen.} \left(2\pi \frac{t}{T} + 2\pi \right) = a \operatorname{sen.} 2\pi \frac{t}{T}.$$

Luego la elongación ha recuperado el mismo valor s que en el tiempo t .

La oscilación *simple* es el pasaje, bien de A a A', bien de A' a A. Su duración es un semiperíodo.

La oscilación *doble* o *completa* es el conjunto de movimientos de A a A', con regreso al punto A. Su duración es igual a un periodo.

Velocidad. — La velocidad en el tiempo t , en el movimiento oscilatorio, es

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{2\pi a}{T} \cos. 2\pi \frac{t}{T}.$$

Aceleración. — La aceleración, en el tiempo t , es

$$\gamma = \frac{d^2s}{dt^2} = -\frac{4\pi^2 a}{T^2} \operatorname{sen.} 2\pi \frac{t}{T}.$$

Y, por tanto,

$$\gamma = -\frac{4\pi^2}{T^2} s.$$

Fuerza que produce el movimiento. — Supongamos que el punto oscilante sea un punto material de masa m . En el tiempo t , está sometido a una fuerza de magnitud $F = m\gamma$ dirigida como la aceleración. Tenemos pues

$$F = -\frac{4\pi^2 m}{T^2} s.$$

So vo que, en cada momento, la fuerza es de intensidad proporcional a la elongación s . Además, siempre se dirige hacia el punto O, porque es negativa (es decir dirigida de derecha a izquierda) cuando la elongación es positiva, y positiva (esto es, dirigida de izquierda a derecha) cuando la elongación es negativa. Como valor absoluto, tenemos:

$$[1] \quad F = \frac{4\pi^2 m}{T^2} s.$$

Recíprocamente, admitamos que cuando un punto material móvil sobre una recta se

halla sometido a una fuerza que, en cada una de sus posiciones, es proporcional a la distancia de un punto móvil a un punto fijo O, tomado en la recta, y que se dirige siempre hacia el punto O, el punto material adquiere un movimiento oscilatorio simple.

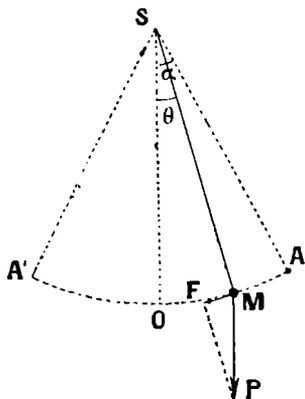


Fig. 103.

Aplicación al péndulo simple. — Supongamos un péndulo simple que efectúe oscilaciones de amplitud muy pequeña. El punto que oscila pasa alternativamente de A a A' (fig. 103), e inversamente, al eje del círculo AA'; pero, a causa de la pequeñez del ángulo α , podemos considerar el arco AA' como una recta. Designemos por a la distancia OA que es la *amplitud lineal* de la oscilación, así como α es la *amplitud angular*.

Sea M la posición de un punto móvil, de masa m , en el tiempo t . Designemos por s la distancia OM y por θ el ángulo OSM. La componente tangencial

$$F = P \operatorname{sen.} \theta = mg \operatorname{sen.} \theta$$

produce por sí sola el movimiento. Como el ángulo θ es muy pequeño, puede confundirse su seno con el mismo arco. De modo que

$$F = mg \theta.$$

Pero, por otra parte, el arco OM = s es igual a $l\theta$. Luego $\theta = \frac{s}{l}$, y, por consiguiente,

$$[2] \quad F = \frac{mgs}{l}.$$

Se ve que la fuerza que actúa sobre el punto M es proporcional a la elongación s y que está dirigida siempre hacia el punto O. El punto M está, pues, animado de un movimiento oscilatorio simple.

Por otra parte, comparemos la expresión que acabamos de hallar para la fuerza F, con la de la fuerza en movimiento oscilatorio simple (ecuación [1]), y se ve que el periodo T de la oscilación del péndulo nos lo da la ecuación.

$$\frac{mg}{l} = \frac{4\pi^2 m}{T^2}.$$

De donde se deduce

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Luego la duración de una oscilación simple, que es la mitad de un periodo, es

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Además, la ecuación del movimiento del punto es

$$s = a \operatorname{sen.}^2 \pi \sqrt{\frac{g}{l}} t.$$

OBSERVACIONES. — 1ª Como el movimiento del punto material de un péndulo simple es un movimiento oscilatorio simple, a este último movimiento se le llama también *movimiento pendular*. Y asimismo se le denomina *movimiento senoidal*, en virtud de la ley que une la elongación y el tiempo.

2ª *Caso de oscilaciones cuya amplitud no es despreciable.* — La teoría completa del caso en que la amplitud angular α es despreciable demuestra que la duración de oscilación no es independiente de esta amplitud. La siguiente fórmula nos da la duración de una oscilación simple :

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \operatorname{sen.}^2 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1.3}{2.4}\right)^2 \operatorname{sen.}^4 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1.3.5}{2.4.6}\right)^2 \operatorname{sen.}^6 \frac{\alpha}{2} + \dots \right]$$

en la cual sólo hemos puesto los primeros términos de la serie que está entre corchetes.

Cuando las amplitudes, sin ser infinitamente pequeñas, son bastante reducidas para poder suprimirles las potencias del seno superiores al segundo grado, y reemplazar el seno por el mismo arco, se escribe :

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left(1 + \frac{\alpha^2}{16} \right).$$

108. **Comparación de la fórmula del péndulo y los experimentos.** — La teoría precedente demuestra que la duración t de una oscilación simple de un péndulo simple de longitud l está indicada por la fórmula

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

cuando la amplitud de las oscilaciones es pequeña.

Esta fórmula demuestra en seguida :

1º Que la duración de oscilación es independiente de la amplitud, cuando ésta es pequeña;

2º Que la duración de oscilación de un péndulo simple es proporcional a la raíz cuadrada de su longitud ;

3º Que la duración de oscilación es independiente de la masa del péndulo.

Se ve que, respecto de estos tres puntos, los resultados de la teoría están de acuerdo con los de los experimentos.

4º La experimentación nos ha enseñado que las duraciones de oscilación de varios péndulos, de igual longitud, pero de diferentes sustancias, son iguales. Por tanto, la magnitud g

que entra en la fórmula $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ representa la aceleración

de la caída del cuerpo que constituye el péndulo. Puesto que la fórmula debe dar el mismo resultado, si l es igual, cualquiera que sea el cuerpo que constituye el péndulo, se deduce que g es la misma para todos los cuerpos. Esto mismo resulta también del experimento del tubo de Newton; pero este experimento no implica mucha exactitud.

109. **Péndulo compuesto. — Péndulo simple sincrónico. — Péndulo reversible.** — Para todo péndulo compuesto, existe indudablemente, un péndulo simple que tiene la misma duración de oscilación. Se llama *péndulo simple sincrónico del péndulo compuesto*.

En efecto, puesto que la duración de oscilación de un péndulo simple puede tomar todos los valores desde cero hasta lo infinito cuando se varía su longitud, habrá necesariamente una longitud para la cual la duración de oscilación será igual a la del péndulo compuesto.

Si se ha medido la duración t de una oscilación simple del péndulo, es fácil calcular la longitud del péndulo simple sincrónico, aplicando la fórmula $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$. De aquí $l = \frac{t^2 g}{\pi^2}$.

Péndulo reversible. — Sea un péndulo compuesto (fig. 104). Hagámosle oscilar, primero, al rededor de un eje representado por el cuchillo superior y después, al rededor de otro eje colocado a una distancia del primero igual a la longitud del péndulo simple sincrónico del péndulo compuesto. La teoría y el experimento demuestran que las dos duraciones de oscilaciones son iguales. Semejante péndulo lleva el nombre de *péndulo reversible*.



Fig. 104.

110. Teoría del péndulo compuesto. — 1º Cálculo de la velocidad angular de un péndulo compuesto en un momento dado. — Sea un péndulo compuesto cuyo eje de suspensión es O (fig. 105) y el centro de gravedad, G_0 , en la posición de equilibrio. Llamemos a a la distancia OG_0 . Apartemos el péndulo de su posición de equilibrio, de modo que el centro de gravedad vaya a G , y designemos por α al ángulo G_0OG . Abandonemos el péndulo a sí mismo y considerémoslo en el momento en que su centro de gravedad se halla en G' : sea θ el ángulo G_0OG' . Representemos por ω la velocidad angular (variable a cada momento) del péndulo, en el instante en que el centro de gravedad pasa a G' ; en este momento, su fuerza viva es $\omega^2 \sum mr^2$ o $\omega^2 I$, designando por I el momento de inercia del péndulo alrededor del ojo O. Como el péndulo sale de OG sin velocidad inicial, la semi-

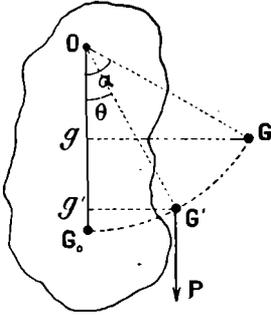


Fig. 105.

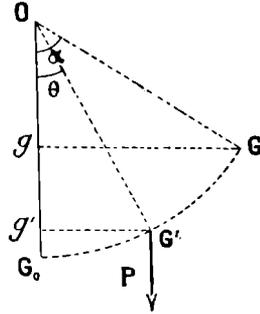


Fig. 106.

fuerza viva, en la posición OG' es igual al trabajo del peso Mg del péndulo durante el movimiento. Pero este trabajo es igual al peso Mg multiplicado por la proyección $\overline{gg'}$ del movimiento sobre la dirección de la fuerza (90). Luego:

$$\frac{1}{2} \omega^2 I = Mg \times \overline{gg'}$$

Pero

$$\overline{gg'} = \overline{Og'} - \overline{Og} = a \cos. \theta - a \cos. \alpha$$

Luego

$$\frac{1}{2} \omega^2 I = Mga (\cos. \theta - \cos. \alpha),$$

de donde

$$\omega^2 = \frac{2Mga}{I} (\cos. \theta - \cos. \alpha).$$

2º Comparación con un péndulo simple. — Sea, por otra parte (fig. 106) un péndulo simple de longitud l y de masa m . Separémosle del mismo ángulo α y busquemos su velocidad en el momento en que pasa por la posición OG' formando el ángulo θ con la posición de equilibrio. Según el teorema de las fuerzas vivas, tenemos:

$$\frac{1}{2} mv^2 = mgl (\cos. \theta - \cos. \alpha)^*.$$

Sea ω' la velocidad angular del péndulo simple en la posición G' , tendremos:

$$v = \omega' l, \quad \text{de donde} \quad \omega' = \frac{v}{l}.$$

Por tanto,

$$\omega'^2 = \frac{v^2}{l^2} = \frac{2gl}{l} (\cos. \theta - \cos. \alpha).$$

Supongamos que $\omega' = \omega$, tendremos:

$$\frac{Mga}{I} (\cos. \theta - \cos. \alpha) = \frac{g}{l} (\cos. \theta - \cos. \alpha).$$

De donde

$$l = \frac{I}{Ma}. \tag{1}$$

* De esta fórmula, se deduce $v = \sqrt{2gl (\cos. \theta - \cos. \alpha)}$. Tal es la expresión de la velocidad de un péndulo simple, en un punto cualquiera de su trayectoria.

Se ve que este resultado es independiente de los ángulos α y θ . Lo cual quiero decir que si el péndulo simple tiene la longitud $l = \frac{I}{Ma}$, cuando se le abandona al mismo tiempo que el péndulo compuesto, separados ambos del mismo ángulo α , los dos péndulos tendrán, en cualquier momento, la misma velocidad angular. Efectuarán, pues, sus oscilaciones, en el mismo tiempo, y el péndulo simple, así determinado, es sincrónico del péndulo compuesto. Por lo tanto, la fórmula [1] expresa la longitud del péndulo simple sincrónico del péndulo compuesto.

También se da otra forma a la ecuación [1]. Sea I_0 el momento de inercia de un péndulo alrededor de un eje paralelo al eje de suspensión, y que pasa por el centro de gravedad. En Mecánica, se demuestra que

$$I = I_0 + Ma^2.$$

Por otra parte, tenemos

$$I_0 = MK^2.$$

K se llama *radio de giro*: es la distancia del eje a la cual se habría de colocar un punto material que tuviera la misma masa M que el péndulo, para que tuviese el mismo momento de inercia I_0 . Luego:

$$I = MK^2 + Ma^2.$$

Sustituyendo este valor en la ecuación [1] tendremos

$$l = a + \frac{K^2}{a}. \tag{2}$$

Aplicación. — Esfera suspendida de un hilo. — Se demuestra que, en una esfera de radio R , el radio de giro K es tal que $K^2 = \frac{2}{5}R^2$.

En consecuencia, si se suspende una esfera de un hilo, de tal modo que la distancia del punto de suspensión al centro de la esfera sea a , la longitud del péndulo simple sincrónico es $l = a + \frac{2R^2}{5a}$.

Así, si $a = 100$ cm. y $R = 0,5$ cm., resultará $l = 100,001$. Se ve que esta longitud difiere muy poco de a .

3º *Reversibilidad.* — Sean O (fig. 107, I) la posición del eje de suspensión y G el centro de gravedad. Sobre la recta OG prolongada tomemos una longitud $GO' = \frac{K^2}{a}$, que designaremos por a' .

La distancia OO' es pues, la longitud del péndulo simple sincrónico del compuesto.

Suspendamos, ahora, el péndulo, de un eje paralelo al primero y que pase por O' (fig. 107, II); según la fórmula [2], la longitud del péndulo simple sincrónico, se convierte en

$$l' = a' + \frac{K^2}{a'}.$$

Pero, como $a' = \frac{K^2}{a}$, será

$$l' = \frac{K^2}{a} + a.$$

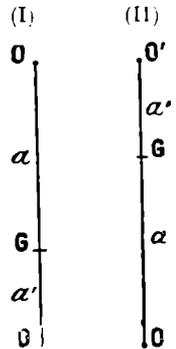


Fig. 107.

Es decir, $l' = l$. La longitud del péndulo simple sincrónico es la misma que en la primera posición; lo cual significa que la duración de oscilación es la misma. Luego los ejes O y O' son *reversibles*.

MEDIDA DE g

141. **Aplicación del péndulo al cálculo de g .** — El único método preciso para calcular la intensidad de la gravedad, se funda en el uso del péndulo; he aquí el principio:

Supongamos que se mide la duración t de una oscilación simple de

pequeña amplitud de un péndulo, y sea, por otra parte, la longitud l del péndulo simple sincrónico. Tendremos :

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad \text{de donde se deduce} \quad g = \frac{\pi^2 l}{t^2}.$$

Este método lo imaginó e indicó Huyghens; pero quien lo aplicó con éxito por la primera vez fué Borda.

1° *Procedimiento de Borda.* — El método de Borda, que ya no se usa, consistía en hacer oscilar el péndulo compuesto, constituido por una esfera de platino suspendida de un alambre de acero. Calculábase la longitud del péndulo simple sincrónico por la fórmula $l = a + \frac{2R^2}{5a}$. Y por consiguiente, bastaba medir a y R .

2° *Procedimiento del péndulo reversible.* — El método actualmente empleado es el del *péndulo reversible* o *péndulo de Kater*. Consiste en hacer oscilar sucesivamente el mismo péndulo alrededor de dos ejes paralelos, *no simétricos con relación al centro de gravedad*, y tales que la duración de oscilación sea la misma. Se miden esta duración de oscilación y la distancia de los dos ejes, que es, pues, la longitud del péndulo simple sincrónico.

Se han construido varios tipos de péndulos reversibles.

Péndulo Defforges. — El péndulo más reciente es el del general Defforges (fig. 104). Sus dos cuchillos son *fixos y cambiables*, y la varilla perfectamente simétrica.

Para obtener este resultado, ya que los dos ejes de reversibilidad no deben ser simétricos, con relación al centro de gravedad, se ha aumentado do peso, *interiormente*, uno de los extremos. La ventaja de la simetría estriba en que, cuando el péndulo oscila sucesivamente alrededor de los dos ejes, el efecto del aire es el mismo.

3° *Causas de error.* — Las medidas de g , hechas con el péndulo, son medidas de alta precisión. Por consiguiente, hay que tener en cuenta numerosas causas de error, de las cuales las principales son las siguientes :

1ª *La temperatura* que modifica la longitud de la varilla del péndulo (244).

2ª *La influencia de la amplitud de las oscilaciones.*

3ª *La influencia del aire.* — El aire obra sobre el peso del péndulo por su empuje (180); en segundo lugar, opone una ligera resistencia al movimiento; en tercer lugar, ésto arrastra siempre una pequeña cantidad de aire que aumenta el peso del péndulo, y, finalmente, obra por su viscosidad.

4ª *El arrastre del soporte por el péndulo.*

Resultados de las diversas medidas. — Todos estos experimentos dan, ya la aceleración g buscada, ya lo que se llama la *longitud del péndulo que marcasse segundos*. Esta magnitud se obtiene evidentemente por la fórmula del péndulo, donde se hace $t = 1$ segundo. Resulta :

$$1 = \pi \sqrt{\frac{L_1}{g}}, \quad \text{de donde} \quad L_1 = \frac{g}{\pi^2}.$$

En París, durante estos últimos años el general Defforges ha efectuado los experimentos más precisos. Ha hallado, en la Oficina Internacional de pesas y medidas (longitud O. = 0,131 grado; latitud N. = 54,26 grados; altitud = 70^m,4) :

$$L_1 = 99^{\text{cm}}, 39, \\ g = 980 \quad , 941.$$

Además, las medidas efectuadas en distintos lugares de la tierra han demostrado que la intensidad de la gravedad disminuye al elevarse en altitud y acercarse al ecuador.

Por eso, a los 80° de latitud, $g = 983$, y bajo el ecuador $g = 978$.

Por otra parte, se puede calcular, mediante una fórmula general,

la intensidad g de la gravedad, en un lugar cuya altitud z es conocida, así como también la latitud λ . Tendremos :

$$g = g_{0,45} (1 - 0,0026 \cos. 2\lambda)(1 - 0,000002z),$$

en donde z está expresado en metros y λ en grados.

En cuanto a $g_{0,45}$, es la intensidad de la gravedad á la latitud de 45° y al nivel del mar : es igual a 980,63.

112. Causas de las variaciones de g . — Estas variaciones se explican fácilmente, admitiendo la hipótesis de la atracción universal.

I. *Influencia de la altitud.* — En primer lugar, se ve que la intensidad de la gravedad debe disminuir a medida que la altitud aumenta; puesto que la atracción que la tierra ejerce sobre un cuerpo varia en razón inversa del cuadrado de la distancia del cuerpo al centro de la tierra : pero, las altitudes de que se dispone en la superficie del globo son demasiado pequeñas para que se haya podido verificar cuantitativamente esta ley *.

II. *Influencia de la latitud.* — 1° En cuanto a la variación con la latitud, ésta se explica por el hecho de que la Tierra es un elipsoide achatado por sus dos polos. Por tanto, los puntos del ecuador están más lejos del centro que los puntos próximos a los polos, y la atracción debe ser menor. Al alejarse del ecuador, se aleja de la protuberancia ecuatorial, que produce a su vez una atracción, y g tiene que disminuir por esta razón. Pero este efecto es menor que el primero.

2° *Influencia de la rotación terrestre.* — Supongamos un punto material M (fig. 108) de masa igual a la unidad, situado en un lugar del globo, de la latitud λ y sujeto de un modo cualquiera, por un hilo, v. gr. Este punto se halla sometido a dos fuerzas : la atracción terrestre A , dirigida hacia el centro de la Tierra, y la reacción P' de su soporte que, en este caso es la tensión del hilo. Toda vez que el punto material está animado de un movimiento circular uniforme, las dos fuerzas a que está sometido deben fusionarse en una sola F' , la fuerza centrípeta, que se dirige hacia el centro O de la circunferencia descrita y que tiene por intensidad $\omega^2 r$, siendo ω la velocidad angular del movimiento de rotación de la Tierra y r el radio OM del paralelo de M .

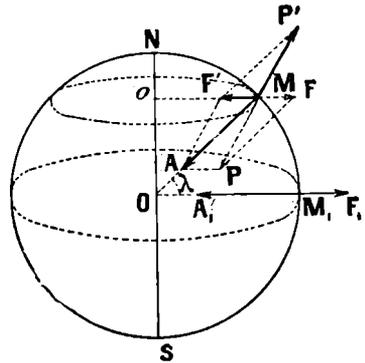


Fig. 108.

En la figura, se ve claramente que la dirección del hilo será la misma que si la Tierra permaneciese inmóvil, y se compusiera, con la atracción A , una fuerza centrífuga MF igual a MF' y directamente opuesta. Estas consideraciones nos hacen ver, en primer lugar, que la plomada será desviada de la posición que tendría si la Tierra estuviera inmóvil, y, después, que la intensidad aparente del peso de M (es decir, la intensidad de la gravedad en M) será MP , resultante de A y de F , más pequeña que la atracción A .

El efecto de la rotación de la Tierra será máximo en un punto del ecuador, tal como M_1 , porque, en este punto : 1° la fuerza centrífuga tiene mayor valor que en M ; puesto que es mayor el radio de la circunferencia descrita; 2° la fuerza centrífuga es directamente opuesta a la atracción.

* Sean g do g' los valores de la intensidad de la gravedad al nivel del suelo y a la altitud z . Se debería tener :

$$\frac{g'}{g} = \frac{R^2}{(R + z)^2}, \quad \text{de donde} \quad g' = g \frac{1}{\left(1 + \frac{z}{R}\right)^2}.$$

La cual puede expresarse :

$$g' = g \left(1 - \frac{2z}{R}\right).$$

despreciando los términos en $\frac{z}{R}$, de grado superior al primero. Estos términos son, en efecto, sumamente pequeños, cuando, como ocurre siempre, z es pequeña con relación a R .

En los polos, al contrario, el efecto de la rotación de la Tierra es nulo, porque la fuerza centrífuga es allí nula.

3° *Valor de la fuerza centrífuga.* — a) *En el ecuador.* — La fuerza centrífuga (para la unidad de masa) tiene por valor $F = \omega^2 R$ (siendo ω la velocidad angular de la Tierra y R , el radio terrestre).

Sea T la duración de la revolución de la Tierra sobre sí misma. Tendremos, $T = 86\ 164$ segundos : es la duración del día sidéreo expresada en segundos de tiempo medio.

Sabemos que $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Luego

$$F = \frac{4\pi^2}{T^2} R.$$

b) *En la latitud λ .* — En el punto M , de latitud λ , la fuerza centrífuga es

$$F = \omega^2 r = \omega^2 R \cos \lambda.$$

143. Variaciones de g en lo interior del globo. — Si la Tierra fuese homogénea, el valor de g sería proporcional a la distancia al centro, cuando se introduce uno en el suelo. En efecto, una consecuencia de la ley de Newton es que un punto interior a una esfera no sufre ninguna atracción, por parte de esta esfera. De lo cual se deduce que, si se considera un punto de masa igual a la unidad, situado debajo del suelo, a una distancia r del centro de la Tierra, la sola masa que lo atrae es la de una esfera de radio r , cuya masa es proporcional a r^3 . La atracción, que varía proporcionalmente a la masa atrayente y en razón inversa de r^2 , es, pues, proporcional a r .

Por otra parte, un experimento de Airy ha demostrado que, al contrario, al introducirse bajo el suelo, g empieza por aumentar. Esto se debe, indudablemente a que la tierra no es una esfera homogénea y que sus capas profundas tienen una densidad más grande que las superficiales (89).

144. Medida de g en el mar. — El método del péndulo no podría ser aplicado a la medición de g en un navío. Y sin embargo, el conocimiento del valor de g sobre los mares es de gran interés. Hasta 1900, la única operación hecha en alta mar, fué la efectuada por M. Nansen, en el Océano glacial Ártico. Después, Hecker, asociándose las ideas del sabio sueco M. Mohn, ha podido medir g en el mar, por el procedimiento siguiente :

Se mide la temperatura de ebullición del agua. Esta temperatura depende de la presión atmosférica y permite calcular dicha presión p en dinas, por centímetro cuadrado (293). Por otra parte, se mide la altura barométrica (154) H . Si d es la densidad del mercurio, la igualdad $p = Hdg$ (154) nos da la presión p . En consecuencia, de esta ecuación en que p es conocida, puede deducirse el valor de g .

145. Péndulo de Foucault. — Entre las aplicaciones del péndulo se debe citar el experimento de Foucault destinado a hacer manifiesto el movimiento de la Tierra, en un punto determinado. He aquí el principio :

Consideremos un péndulo pendiente de un hilo. Si la fuerza que produce el movimiento actúa siempre en el plano vertical de oscilación, éste permanece invariable, porque la fuerza tiende siempre a mantener ahí al péndulo. Lo mismo ocurriría si el hilo de suspensión estuviera sujeto a fuerzas que actuarán para imprimirle una torsión :

el efecto de esas fuerzas sería hacer girar sobre sí mismos al hilo y a la bola atada a él. Esto se puede observar, como lo ha hecho Foucault, haciendo girar rápidamente el soporte de un péndulo (fig. 109) : se ve que el plano de oscilación no varía durante la rotación. El caso teórico que hemos supuesto se realizaría en uno de los polos de la Tierra, como Foucault lo ha demostrado el primero. En efecto, la dirección de la vertical del punto es fija; la rotación de la Tierra no actúa sino para torcer el hilo; en el polo, el plano de oscilación de un péndulo sería, pues, invariable. Pero un observador que mirase al péndulo girando, sin sospecharlo, de oeste a este, como la misma tierra que lo sostiene, vería el plano de oscilación del péndulo girar en dirección inversa, de esto a oeste, en la dirección del movimiento de las estrellas y dando una vuelta completa en un día sideral.

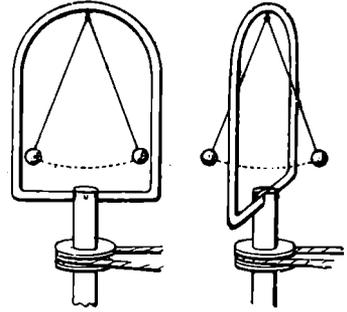


Fig. 109.

En el ecuador, por el contrario, se demuestra que el plano de oscilación debe parecer inmóvil. En un punto de latitud λ , la teoría hace ver que debo haber movimiento aparente de rotación del plano de oscilación del péndulo con una velocidad angular $\omega \text{ sen. } \lambda$, siendo ω la velocidad angular de la Tierra.

Foucault lo ha demostrado en un experimento célebre hecho en el Panteón. El péndulo, de 79 metros de largo, se componía de un alambre de acero del cual pendía una bola de cobre de 25 kilogramos de peso, provista por abajo de una punta que, a cada oscilación, hacía una raya en dos montoncitos de arena húmeda, marcando así 2 mm. 3 a cada oscilación.

Además, el experimento se puede repetir fácilmente en una sala ordinaria, con un aparato de dimensiones más pequeñas (experimentos de Nenot y Berget).

116. Medida del tiempo. — Péndulo regulador de Huygens. — La duración de un fenómeno puede medirse por segundos, contando el número de oscilaciones de un péndulo de segundos durante esta duración. Los relojes son aparatos que permiten aborrarse esta operación y que señalan automáticamente, en una esfera, el número de oscilaciones del péndulo. Esto se consigue por medio de un mecanismo ideado por Huyghens.

La varilla del péndulo regulador (fig. 110) pasa por una horquilla *a* destinada a transmitir el movimiento a otra varilla *b*, la cual está enlazada con un eje horizontal *O*. Fija a éste se encuentra una pieza *mn*, llamada *escape de áncora* por causa de su forma y que termina en sus extremidades formando dos paletas que se encuentran alternativamente en contacto con los dientes de una rueda *R*, nombrada *rueda de encuentro*, o también *rueda de escape* y *rueda de punzón*. Esta rueda, solicitada por el motor, sea cual fuere, que hace andar el reloj por medio de un

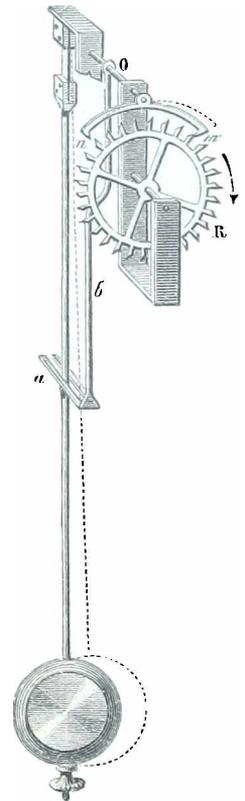


Fig. 110.

motor, sea cual fuere, que hace andar el reloj por medio de un

engranaje, tiende a adquirir movimiento de rotación continuo en el sentido indicado por la flecha. Si el péndulo está en reposo, la rueda es detenida por la paleta *m*, y con ella todo el mecanismo. Por el contrario, si el péndulo oscila y toma la posición indicada por la línea de puntos, el diente que tocaba contra la paleta *se escapa*, y la rueda gira, pero sólo avanza medio intervalo de dos dientes consecutivos, porque la paleta *n* va a detener un diente a su vez. Luego, en la oscilación siguiente, este diente se escapa, y entonces la paleta *m* es la que para el diente que sigue al que paró primero, y así sucesivamente, de modo que a cada oscilación doble del péndulo, la rueda de encuentro adelanta un diente. Ahora bien, las oscilaciones de este aparato tienen escasa amplitud y son isócronas: por consiguiente, la rueda de encuentro y el mecanismo del reloj, que es solidario de ella, andan y se paran en intervalos iguales, marcando divisiones iguales del tiempo.

Para que el reloj marque exactamente el tiempo en segundos es preciso poder arreglar su marcha, a voluntad, si se adelanta o se atrasa. Esto se consigue subiendo o bajando la lenteja por medio de una tuerca que tiene la varilla. Si se disminuye la longitud del péndulo, subiendo la lenteja, oscila con más rapidez. Lo contrario sucede si se baja la lenteja.

Efectos de la temperatura. — Péndulos compensadores. — Las variaciones de la temperatura ambiente tienen también por efecto variar la longitud del péndulo. Si el reloj está regulado para una temperatura media, adelantará, durante los fríos, y atrasará, en la época de los calores. Estas variaciones se impiden por medio de los péndulos compensadores (248).

Puede remediarse mucho más sencillamente este inconveniente, construyendo la varilla del péndulo con acero con 36 por 100 de níquel, o con metal invar, que no sufre ninguna variación apreciable de longitud, por la temperatura.

117. Balancín de resorte espiral. Relojes de bolsillo, crónometros y cronógrafos. — Un principio enteramente análogo fué aplicado por Huyghens para regular el movimiento de los relojes de bolsillo y de los cronómetros.

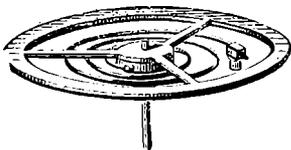


Fig. 111.

En estos instrumentos, el movimiento lo comunica un resorte, previamente arrollado, a una serie de ruedas, la última de las cuales es de escape, que hace el mismo oficio que la de los relojes. El escape de áncora es uno de los más empleados y funciona como en los relojes, salvo la manera como se imprime el movimiento al áncora, que es movida por el eje de un volante, al que está sujeto el extremo de un *resorte espiral* cuyo otro extremo es fijo (fig. 111). Una vez puesto en movimiento este sistema efectúa oscilaciones isócronas, porque la reacción elástica del resorte es proporcional al ángulo de separación. Las oscilaciones del volante aseguran la marcha regular de la rueda de escape y, por consiguiente, la de todo el mecanismo. Hay que añadir

que a cada oscilación el diente que pasa comunica al volante una débil impulsión que conserva su movimiento.

La duración de oscilación del volante se regula haciendo variar un poco la longitud del resorte espiral. Cuanto más corto es éste tanto más rápidas son las oscilaciones. La temperatura ejerce también su influencia en la marcha de relojes y cronómetros. Para eliminar tal influencia, se emplean *cilindros compensados* (248).

Cronógrafos. — Los relojes y cronómetros no se prestan a la medida de pequeños intervalos de tiempo. Para esto se emplean métodos de inscripción gráfica, por medio de aparatos llamados *cronógrafos registradores* que estudiaremos más adelante (390).

118. **Fomento eléctrico de las oscilaciones del péndulo. Péndulo Lippmann.** — En la disposición introducida por Huyghens la rueda de escape, a cada oscilación simple, aplica al péndulo la impulsión necesaria para sostener su movimiento. Esta es una causa constante de perturbación que era conveniente suprimir.

M. Lippmann ha concebido y realizado un péndulo sostenido sin perturbación, cuyo funcionamiento se funda en la proposición siguiente:

Si se imprimen dos impulsos iguales al péndulo en un mismo punto de su trayectoria, una de ida y otra de vuelta, las perturbaciones que producen son iguales y de dirección contraria.

En particular, cuando los impulsos se verifican al pasar por la vertical, no producen ninguna perturbación, ni aun considerados separadamente.

Modelo de A. Guillet y V. Duffau. — M. A. Guillet ha satisfecho las condiciones precedentes, produciendo los impulsos por medio de corrientes de inducción debidas al cierre y a la abertura de un circuito inductor; el péndulo abre y cierra el circuito inductor, cuando aquél pasa por la vertical en dos sentidos.

El siguiente mecanismo ha sido instalado por los señores Guillet y Duffau. El péndulo OP (fig. 112) contiene un sistema de dos imanes paralelos NS, N'S' cuyos polos están invertidos, a fin de prevenir su desimantación. Los extremos de estos imanes, se introducen en cuatro carretes que reciben la corriente inducida producida del modo que vamos a exponer. Al péndulo, va fijo un pequeño gancho C que en el momento en que el péndulo pasa por su posición de equilibrio en el sentido de la flecha, separa una lámina elástica *bl* de una punta *a* sobre la cual se apoyaba. La lámina *l* y la punta *p* forman parte de un circuito que contiene una pila *P'* y el alambre principal 1 de un transformador T. En el momento considerado, la corriente primaria se interrumpe. En el circuito secundario 2, resulta una corriente inducida que se envía a los carretes, en los cuales circula de manera que las acciones que se ejercen sobre los cuatro polos concuerden para dar al péndulo impulsos de mismo sentido. Una segunda corriente inducida, de sentido contrario a la primera, se produce un semiperíodo después, cuando el péndulo, al volver a pasar en sentido inverso por su posición de equilibrio, cierra el circuito principal.

Además, entre los puntos *a* y *b*, se halla, en derivación, un circuito de gran resistencia que contiene un alternador entre *l* y *a* R. Mientras está cerrado el circuito en el circuito del alternador no se produce sino una corriente insensible a causa de su gran resistencia; pero, así que se abre el circuito en *l a*, pasa una corriente al alternador. Esta corriente se utiliza para accionar un reloj eléctrico que marca las horas, los minutos y segundos, en una esfera. Este aparato sólo consume una cantidad de energía insignificante; basta una pila seca para sostener el péndulo durante un año.

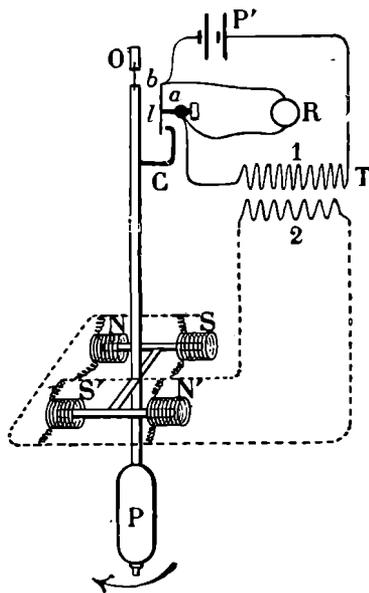


Fig. 112.

LIBRO II

HIDROSTÁTICA

CAPÍTULO I

CARACTERES GENERALES DE LOS LÍQUIDOS

119. **Definiciones.** — **Hidrostática.** — Se llama *Hidrostática* la parte de la Física que tiene por objeto el estudio de los líquidos, *en equilibrio*, por oposición a la *Hidrodinámica*, que estudia el agua y los demás líquidos *en movimiento*.

Compresibilidad de los líquidos. — Durante mucho tiempo, el agua y los demás líquidos han sido considerados como absolutamente incompresibles; pero veremos (225) que todos los líquidos son, aunque poco, más o menos compresibles.

Elasticidad de los líquidos. — Sea cual fuere la compresión a que se someta un líquido, la experimentación demuestra que, en cuanto cesa el exceso de presión, el líquido vuelve exactamente a su primitivo volumen: de donde se deduce que los líquidos son *perfectamente elásticos*.

120. **Fuerzas que los líquidos ejercen en las paredes de los recipientes que los contienen.** — 1º *Todo líquido en equilibrio en un recipiente ejerce, en las paredes de éste, fuerzas dirigidas hacia el exterior, cualquiera que sea la orientación de estas paredes.*

Para demostrarlo, se toma un tubo de cristal A (fig, 113), cerrado por una cápsula de caucho,

y que, por medio de un tubo de goma, se pone en comunicación con un recipiente V. Cuando se llena de agua el aparato, hinchase la cápsula, que indica, así, la existencia de

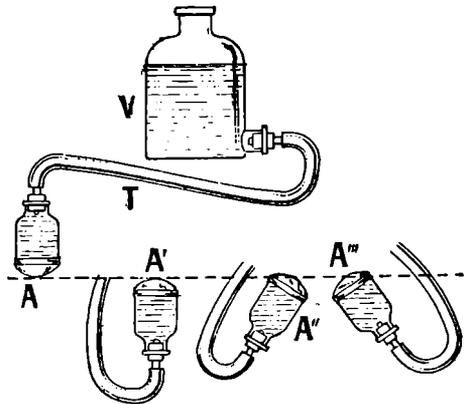


Fig. 113.

una fuerza ejercida por el líquido : el experimento se cumple, cualquiera que sea la orientación que se dé a la pared.

2º *La fuerza ejercida por un líquido contra una porción de pared del recipiente que lo contiene es perpendicular a la superficie de ésta.* — Sustituimos la cápsula de caucho por una ligera lámina metálica, hora-

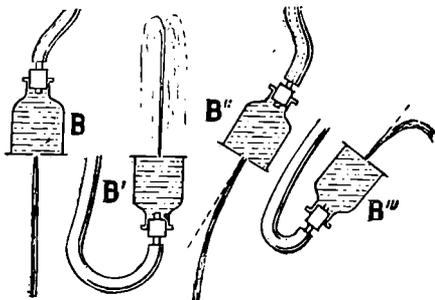


Fig. 114.

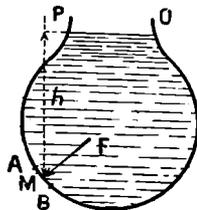


Fig. 115.

dada por una pequeña abertura que pueda cerrarse a capricho (fig. 114). Veremos que, al destapar el orificio, el agua sale inmediatamente, y sea cual fuere la orientación de la pared, el chorro le será, al principio, perpendicular. Luego se combará, bajo la acción de su peso, y adquirirá forma parabólica, siempre que la pared no sea horizontal.

De este experimento se deduce que la fuerza ejercida por el líquido, en la porción de pared correspondiente al orificio, era normal a esta pared, antes de destapar el agujero.

La figura 115 representa la fuerza F que el líquido ejerce contra una pequeña porción AB de la pared de un recipiente lleno de líquido.

121. **Fuerzas ejercidas en una superficie sumergida en un líquido.** — *Contra una superficie pequeña CD (fig. 116), sumergida en un líquido,*

se ejercen, en sus dos caras, dos fuerzas normales y de la misma intensidad.

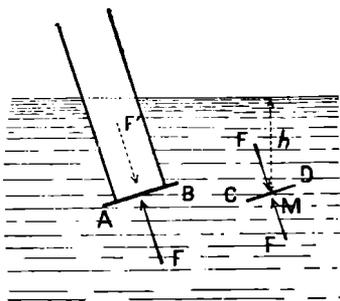


Fig. 116.

En efecto, tomemos un tubo de cristal, cuyos hordes inferiores muy rectos, estén cerrados por un obturador ligero AB , por ejemplo. Sumerjamos el tubo en el agua, en una posición cualquiera, vortical o inclinada, y veremos que el obturador se aplica contra los bordes del tubo, por efecto de la fuerza F que ejerce el líquido. Si se vierte, despacio, agua en el tubo, nótase que el obturador se desprende

cuando existe el mismo nivel en lo interior y en lo exterior. Luego, al llegar a esta igualdad de nivel, el líquido contenido en el tubo ejerce una fuerza F' igual a F . El obturador se encuentra, pues, en la misma situación que una superficie CD que estuviera sumergida en el líquido.

122. **Presiones ejercidas por un líquido.** — En las superficies AB (fig. 115) o CD (fig. 116), sometidas a fuerzas normales, actúan pre-

siones, que se determinan hallando el cociente de la fuerza por la superficie.

Llamamos *presión en un punto M* de la pared o de la superficie sumergida, a la *presión en una superficie infinitamente pequeña que rodea a este punto*.

Si la superficie está prensada uniformemente, dicha presión es la fuerza que se ejerce en 1 cm² alrededor del punto. En caso contrario, para valuar la presión p en M , hay que considerar una pequeña superficie de área S , que rodea al punto M , y la fuerza F que el líquido ejerce sobre S . Entonces, p es el límite hacia el cual tiende el cociente $\frac{F}{S}$ cuando la superficie tiende a cero al mismo tiempo que su perímetro, sin dejar de rodear al punto M : este límite del cociente $\frac{F}{S}$ es el sentido que se debe atribuir a la definición de la *presión en un punto*.

La presión en un punto de una pared o de una superficie sumergida no depende de la orientación de esta pared o de esta superficie, sino sólo de la profundidad en que se encuentra; esto resulta de los experimentos precedentes.

Presión en un punto de la masa líquida. — Sea un punto M en el seno de un líquido; la presión sobre una superficie infinitamente pequeña que rodea ese punto (independiente de la orientación de la superficie), se llama presión en el punto M de la masa líquida.

123. Principio fundamental de la hidrostática. — *La diferencia de las presiones en dos puntos cualesquiera de un líquido pesado en equilibrio, es igual al peso de un cilindro del líquido que tenga por base la unidad de superficie y por altura la distancia vertical de estos dos puntos.*

Este principio se puede demostrar *a priori*, o verificarlo por medio de experimentos, por supuesto poco precisos.

I. Demostración. — Sean A y A' los dos puntos (fig. 117). l su distancia y h su distancia vertical, p y p' las presiones en A y en A' , d la masa específica del líquido, g la intensidad de la gravedad.

Tomemos al rededor de los puntos A y A' , en direcciones cualesquiera, *capas elementales* de líquido. Como están en equilibrio, podemos solidificarlas con el pensamiento, es decir que podemos razonar como si estuvieran formadas de discos sólidos. Sea S la superficie del elemento A . Imaginemos un cilindro que tenga por base este elemento y sus generatrices paralelas en AA' : este cilindro cortará una superficie S' en el elemento A' . Así tenemos un *hilo* cilíndrico infinitamente pequeño, cuyo volumen es, como ya sabemos, igual a σl , siendo σ la sección recta y l la distancia de los centros de gravedad de las bases, la cual puede confundirse con la distancia AA' .

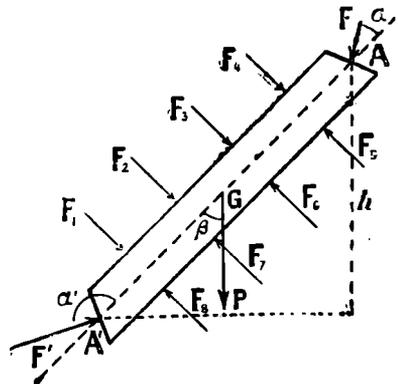


Fig. 117.

Estando en equilibrio este hilo líquido, podemos igualmente solidificarlo con el pensamiento. Entonces todo ocurre como si fuera un cuerpo sólido en equilibrio bajo la acción de un sistema de fuerzas, a saber: su peso y

las fuerzas que el líquido ambiente ejerce en su superficie. Por consiguiente, si se proyectan todas las fuerzas del sistema sobre una recta cualquiera, por ejemplo sobre el eje AA' del cilindro, *la suma algebraica de estas proyecciones debe ser nula.*

Ahora bien, estas fuerzas son :

1º El peso P, del hilo, aplicado en su centro de gravedad G y formando un ángulo β con el eje de figura. Es igual a $\rho l d g$ o $\frac{\rho h d g}{\cos \beta}$, observando que $l = \frac{h}{\cos \beta}$;

2º La fuerza F ejercida por el líquido sobre la sección A. Si p es la presión sobre A, se tiene $p = \frac{F}{S}$, de donde $F = pS$. Esta fuerza forma un ángulo α con AA'; se puede

representar por $F = \frac{p\sigma}{\cos \alpha}$, observando que $S = \frac{\sigma}{\cos \alpha}$;

3º La fuerza F' ejercida sobre A'. Si p' es la presión sobre A', $F' = p'S'$. Esta fuerza forma un ángulo α' con AA', y se tiene $F' = \frac{p'\sigma}{\cos(180^\circ - \alpha')}$ porque $S' = \frac{\sigma}{\cos(180^\circ - \alpha')}$;

4º Las fuerzas laterales F_1, F_2, \dots que son normales a la superficie del cilindro, y por consiguiente perpendiculares al eje : sus proyecciones sobre el eje AA' son nulas.

Para obtener las proyecciones de todas estas fuerzas, basta multiplicar cada una de ellas por el coseno del ángulo que forma con la dirección AA". Se tiene pues :

$$P \cos \beta + F \cos \alpha + F' \cos \alpha' = 0.$$

Siendo agudos los ángulos β y α , el ángulo α' es obtuso; su coseno es, pues, negativo. Pongamos en evidencia este signo, reemplazando $\cos \alpha'$ por el coseno del suplemento. Téñese :

$$\cos \alpha' = -\cos(180^\circ - \alpha'),$$

y la ecuación se convierte, haciendo pasar los dos últimos términos al segundo miembro, en

$$F' \cos(180^\circ - \alpha') - F \cos \alpha = P \cos \beta.$$

Reemplazando F', F y P por sus valores, dados anteriormente, y suprimiendo los factores comunes, resulta

$$p' - p = h d g.$$

que es lo que se trataba de demostrar.

Al mismo tiempo, se ve que si la presión p en la base A del cilindro nos es dada, la presión p' , sobre la otra base, no depende de la orientación de esta superficie. Recíprocamente, si se nos da p' , deducimos de ella p que no depende de la orientación de la superficie A.

II. Demostración experimental. — 1º Coloquemos la cápsula de caucho del aparato precedente (fig. 113) en diversas orientaciones, *cuidando de mantenerla siempre al mismo nivel* : veremos que *se hincha lo mismo* en todas posiciones. Por el contrario, si se la coloca a nivel más elevado, se hincha menos; y, más, si el nivel es más bajo.

Cualquiera que sea la orientación de una pequeña porción de pared, sufre la misma fuerza que si fuese horizontal y colocada a igual profundidad. Lo mismo ocurre cuando la superficie no forma parte de la pared, porque, en el experimento ya descrito (121), mientras el obturador no se suelta, forma parte de la pared del recipiente, y la fuerza que el líquido ejerce sobre él permanece la misma en el momento de desprenderse; entonces constituye una superficie sumergida.

2º *Diferencias de presiones en dos puntos.* — Tomemos un tubo vertical (fig. 118) cerrado por un obturador de superficie S y sumergido en el agua de un cubo. Tratemos de medir, en dos posiciones diferentes, las fuerzas F y F₁ a que está sometido el obturador. Para conseguirlo, se puede, por ejemplo, colocar sobre este obturador un peso P e introducir el tubo, teniendo el obturador con la mano a una profundidad lo suficientemente grande para que, siendo la fuerza F superior al peso P, no se desprenda al retirar la mano. Entonces, se extrae despacito el

tubo. A un momento dado, suéltase el obturador. La fuerza F es, en este instante, igual a P . Se nota, lo más cuidadosamente posible, la sección MN del tubo a la que llegaba el agua al desprenderse el obturador.

Después, se comprueba que el peso de agua que llenaba el volumen del tubo, por debajo de MN es precisamente igual al punto de la masa P .

Se puede repetir el experimento con un segundo peso P_1 mayor que el primero. Se verá, también, que la fuerza F_1 , que iguala al peso de P_1 es igual al peso del volumen de agua que llene el tubo hasta M_1N_1 .

La diferencia de las fuerzas ejercidas en el obturador en ambas posiciones sucesivas es, pues, igual al peso de un cilindro

del líquido, que tiene por base esta superficie y por altura la diferencia de nivel de sus dos posiciones. Y la diferencia de presiones, es decir, la diferencia de las fuerzas que se ejercen sobre 1 cm^2 del obturador en las dos posiciones es, por consiguiente, igual al peso de la columna líquida que tiene por base 1 cm^2 y por altura la diferencia de nivel.

III. *Consecuencias del principio.* — En un líquido en equilibrio, la presión es la misma en todos los puntos de un plano horizontal.

En efecto, la diferencia de presión en los diversos puntos del plano debe ser nula; puesto que la diferencia de nivel de estos puntos es nula.

124. **Transmisión de presiones por los líquidos.** — **Principio de Pascal.** — Un líquido transmite íntegramente, en todos sentidos, cuantas presiones se ejerzan sobre él. Esta propiedad general de los líquidos, supuestos completamente elásticos y completamente fluidos, constituye un principio de hidrostática que, por lo común, se enuncia así :

Si en la superficie de un líquido en equilibrio se ejerce una fuerza, ésta se transmite íntegramente a toda la porción plana de pared igual a la superficie prensada.

Supongamos un líquido contenido en un recipiente provisto de una abertura cilíndrica cerrada por un pistón (fig. 119). Ejercemos cierta fuerza sobre este último. Por otra parte, el volumen del

líquido disminuye sumamente poco. Esta disminución de volumen tiene por consecuencia una reacción elástica que hace equilibrio a la fuerza que se acaba de ejercer. Por tanto, la presión sobre AB aumenta. Si, por ejemplo, la superficie del pistón es de 2 cm^2 y apoyamos con una fuerza de 40 kilogramos, la presión aumenta, en AB , 5 kilogramos por centímetro cuadrado. Según el principio fundamental (123), las diferencias de presión entre los diversos puntos deben continuar iguales,

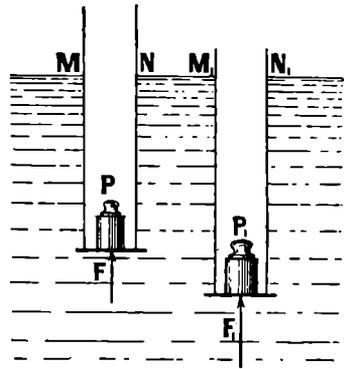


Fig. 118.

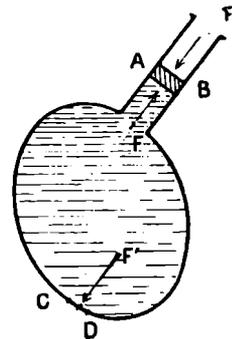


Fig. 119.

ya que las diferencias de nivel no cambian. En consecuencia, la presión tiene que haber aumentado por todas partes en la misma cantidad, esto es, 5 kilogramos, por cada centímetro cuadrado CD de pared.

Este principio se llama *Principio de igualdad de presión*, o bien, *Principio de Pascal*, porque Pascal lo enunció de modo más concreto*.

Expresión del principio. — Si llamamos, en general, F a la fuerza ejercida sobre AB y S a la superficie de AB , la fuerza ejercida por el líquido aumentará, en una porción CD de superficie S' , una cantidad F' tal, que tendremos :

$$\frac{F'}{S'} = \frac{F}{S}$$

125. Influencia de la presión atmosférica en las fuerzas ejercidas por un líquido. — Más adelante (151), veremos que la atmósfera ejerce, como los líquidos, fuerzas de presión sobre todos los cuerpos sumergidos en ello. Además, puede admitirse que la presión atmosférica es la misma en dos puntos cuya diferencia de nivel no sea grande.

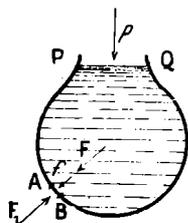


Fig. 120.

Si colocamos, en el aire, un recipiente (fig. 120) que contenga un líquido, la presión atmosférica que se ejerce sobre la superficie libre PQ se transmite a todo el líquido. A la fuerza f que el líquido, si se hallase en el vacío, ejercería sobre un elemento de superficie AB , se añade la fuerza F , debida a la presión atmosférica que el líquido transmite. Pero, por la parte exterior, la presión atmosférica ejerce una fuerza F_1 , igual y directamente opuesta a F , con la cual se equilibra.

Luego la fuerza que se observa en la pared se reduce a la ejercida por el líquido solo, cualquiera que sea la forma del recipiente. Esta observación se aplica a todos los experimentos que preceden.

126. Expresión de la fuerza ejercida por un líquido sobre una porción de pared. — Sea una porción AB (fig. 115) de la pared de un recipiente, de superficie igual a S cm^2 , y colocada a h cm . de profundidad bajo la superficie libre del líquido. Como la presión que éste ejerce en PQ es nula, la presión en M es igual al peso de una columna de líquido que tenga por base 1 cm^2 y por altura h cm . El volumen de esta columna es h cm^3 y, si llamamos d a la densidad del líquido y si su masa es hd gramos, su peso será :

$$p = \text{peso de } hd \text{ gramos} = hdg \text{ dinas.}$$

Si la superficie AB es horizontal, o si su magnitud es bastante pequeña para que puedan considerarse todos sus puntos como a un mismo nivel, la fuerza F que el líquido ejerce sobre AB es igual a pS o

$$F = \text{peso de } hdS \text{ gramos} = hdSg \text{ dinas.}$$

* Si un pequeño recipiente, lleno de agua, cerrado por todas partes, tiene dos aberturas, una de las cuales sea cien veces mayor que la otra, poniendo a cada una un émbolo que ajuste bien, un hombre que apriete este émbolo igualará la fuerza de cien hombres que empujen al que es cien veces mayor y vencerá a noventa y nueve.

CONSECUENCIAS. — *Experimento de Pascal.* — Esta fuerza es independiente de la forma del recipiente, el cual puede ser tan estrecho como se quiera por encima de la superficie considerada. Así pues, por medio de una cantidad muy limitada de líquido, pueden ejercerse fuerzas considerables. Pascal efectuó el experimento siguiente :

Coronó un tonel lleno de agua con un tubo delgado, de unos 10 metros de altura, y llenando el tubo, consiguió hacer reventar el tonel, sin más que este simple hilo de agua. En efecto, se ve que 1 decímetro cuadrado tomado en la pared del tonel, se hallaba sometido a una fuerza igual al peso de una columna de agua de 10 metros de altura y de 1 decímetro cuadrado de base, o sean, 100 kilogramos.

He aquí, otro experimento parecido : Se toma un matraz completamente lleno de agua (fig. 121), provisto de un tapón bien adherido a él y atravesado por un tubo que llegue hasta el fondo del matraz, en el cual tubo se vierte mercurio. Basta que el mercurio se eleve hasta 1 metro, poco más o menos, en el tubo, para que estalle el matraz. En efecto, como el mercurio tiene por densidad 13,6, ejerce, sobre cada centímetro cuadrado de la pared del matraz, una presión igual al peso de $100 \times 13,6 = 1\ 360$ gramos.

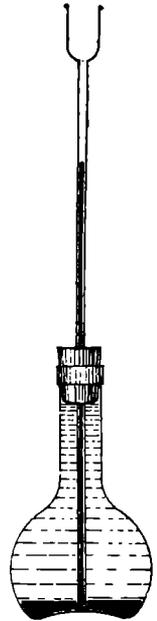


Fig. 121.

Presiones en el fondo de los mares. — Según este principio, se pueden calcular las presiones en el fondo de los mares. En las exploraciones verificadas a bordo del *Planet*, en 1912, se ha descubierto en el Pacífico, cerca de Filipinas, una fosa de 9 780 metros. En esa profundidad existe una presión superior a 1 000 kilogramos por cm^2 . En las verificadas a bordo del *Planet*, y luego del *Travailleur* la sonda no llegaba, a veces, a la profundidad de 8 000 metros. Luego en el fondo de ciertos mares, se ejerce una presión de 800 kilogramos por centímetro cuadrado.

127. **Fuerzas ejercidas por un líquido sobre una pared plana lateral.** — **Teorema.** — *En un líquido grave en equilibrio, las fuerzas ejercidas sobre una porción plana de pared lateral tienen una resultante que es normal a la pared e igual al peso de un cilindro del líquido que tenga como base la porción de pared considerada y como altura la distancia de su centro de gravedad a la superficie libre. Aplícase en un punto que se llama centro de presión.*

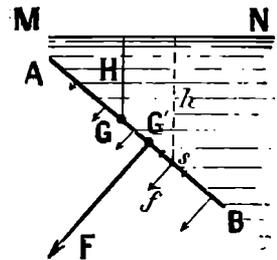


Fig. 122.

Demostración. — Lloremos un plano vertical perpendicularmente a la pared y tomémosle como plano de figura. Sean MN y AB las secciones de la superficie libre y de la porción plana de pared (fig. 122).

Sobre cada elemento de superficie, tal como s , se ejerce una fuerza elemental f , que le es normal. Siendo paralelas todas estas fuerzas, tienen una resultante única F , que le es paralela, igual a la suma, y aplicada en el centro de este sistema de fuerzas paralelas. Tiénesse, pues,

$$F = \Sigma(f).$$

Ahora bien, en un punto del elemento, la presión p está dada por la ecuación fundamental $p = p_0 + hdg$, siendo p_0 la presión ejercida en un punto cualquiera de la superficie libre. Desdeñando esta última presión (125) se tiene,

$$p = hdg \quad y \quad f = shdg;$$

luego

$$F = \Sigma(shdg) = dg \Sigma(sh).$$

Pero si se atribuye arbitrariamente a la unidad de superficie de la pared una masa δ , tendremos

$$\Sigma(sh\delta g = \delta g \Sigma(sh).$$

Ahora bien, $s\delta g$ es el *peso* del elemento de pared s , y siendo h la distancia de su punto de aplicación (que es un punto cualquiera del elemento al plano de la superficie libre, el producto $sh\delta g$ es el *momento de la fuerza $s\delta g$ respecto del plano $M. N.$* Luego la suma $\Sigma(sh\delta g)$ es la suma de los momentos de los pesos de los diversos elementos de la porción de pared. Según el teorema de los momentos, esta suma es igual al momento de la resultante, es decir, al momento del peso total de la porción de pared. Sea S la superficie total de esta porción, su peso es $S\delta g$; sea H la distancia del centro de gravedad G a la superficie libre, el momento del peso total es $SH\delta g$. Tenemos pues :

$$\Sigma(sh\delta g) = SH\delta g, \quad \text{de donde} \quad \delta g \Sigma(sh) = SH\delta g \quad y \quad \Sigma(sh) = SH.$$

Por consiguiente $F = SHdg$, que es lo que se debía demostrar.

OBSERVACIÓN. — El *centro de presión G'* , que es el punto de aplicación de la fuerza total sobre la porción de pared considerada, es necesariamente distinto del centro de gravedad de esta pared, el cual es el punto de aplicación del peso total de su superficie, que suponemos grave.

128. Fuerzas ejercidas sobre todas las paredes de un vaso. — Teorema. — *En un líquido grave en equilibrio, todas las fuerzas que el líquido ejerce sobre todas las paredes del vaso que lo contiene, sea cual fuere su forma, tienen una resultante, que es una fuerza dirigida de arriba a abajo, e igual al peso total del líquido.*

Verificación. — Los experimentos prueban, en efecto, que si en un vaso puesto en el platillo de una balanza, se echa un líquido, la balanza indica el peso de ese líquido, cualquiera que sea la forma del vaso.

Demostración. — También se puede demostrar *a priori* este teorema.

Sea un líquido grave en equilibrio en un vaso. El líquido está en equilibrio bajo la influencia de dos sistemas de fuerzas : por una parte, los pesos de las moléculas líquidas que tienen una sola resultante igual al peso total del líquido ; por otra parte, las resistencias o reacciones f, f', f'' , que los elementos de pared oponen a los elementos líquidos yuxtapuestos. Como este último sistema equilibra al primero, tiene necesariamente una resultante única, igual y opuesta al peso total del líquido. Ahora bien, estas reacciones elementales de las paredes son iguales y opuestas, cada una de por sí, a las fuerzas elementales f, f', f'' , ejercidas por el líquido sobre la pared ; luego este último sistema tiene también una resultante única, precisamente igual al peso total del líquido, y dirigida en el mismo sentido.

OBSERVACIÓN. — Supongamos tres vasos de igual fondo horizontal (fig. 123), pero de forma diferente, llenos de agua hasta la misma altura. La fuerza que ejerce el líquido sobre el fondo es la misma para los tres vasos ; es igual al peso de la columna cilíndrica de agua, que tiene por base el fondo y por altura la del agua en el vaso. Sin embargo si se ponen los vasos en una balanza, ésta indica el peso del líquido, que es, para el vaso I, igual a la fuerza ejercida sobre el fondo, pero que es mayor que dicha fuerza para el vaso II, y menor para el vaso III.

En efecto, en el caso del vaso I, las fuerzas laterales F_1 F_1' son horizontales y se equilibran dos a dos; la fuerza ejercida sobre la balanza es, pues, igual a la ejercida sobre el fondo. En el caso del vaso II, cada una de las fuerzas ejercidas sobre las paredes laterales puede descomponerse en dos: una horizontal, equilibrada por la componente análoga sobre el elemento simétrico, la otra vertical, dirigida de arriba abajo, que añade su acción a la de la fuerza ejercida sobre el fondo. Si, por el contrario, el vaso tiene la forma (III), las componentes verticales van dirigidas de abajo arriba y se restan de la fuerza ejercida sobre el fondo.

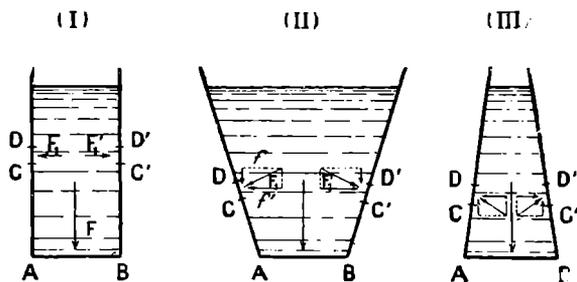


Fig. 123.

129. **Prensa hidráulica.** — Este aparato es una aplicación del principio de Pascal. Fué ideado por Pascal; pero no se construyó hasta 1796, época en que lo hizo el ingeniero inglés Bramah.

Principio. — Imaginemos un líquido contenido en un vaso (fig. 124) compuesto de dos cuerpos de bomba C, C', de secciones diferentes S, S', cerrados por émbolos P, P' y reunidos por un tubo A y B.

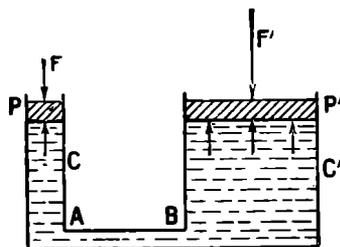


Fig. 124.

Si se efectúa un esfuerzo F sobre P , cargándole por ejemplo de pesos, el pistón P' tiende a levantarse, y para mantenerlo en equilibrio hay que aplicarle una fuerza F' que es a F como S' es a S . Si S' es 10, 100, 1 000 veces mayor que S , F' será 10, 100, 1 000 veces más considerable que F .

OBSERVACIÓN. — Si S es mayor que S' , se gana, pues, en fuerza, pero se *pierde en camino recorrido*. En efecto, cuando P baja de cierta altura, el volumen de agua que pasa de C a C' hace subir a P' una altura más pequeña. Demuéstrase que el trabajo obtenido por medio de la prensa es igual al trabajo necesario para levantar directamente el émbolo mayor.

En efecto, sea h la altura a que se ha llevado el émbolo pequeño. Se ha efectuado un trabajo motor $T = Fh$. El volumen de agua que pasa al gran cilindro es Sh ; hace elevar al émbolo mayor a una altura h' , tal que el volumen $S'h'$, sea igual a Sh . Luego

$$S'h' = Sh, \quad \text{de donde} \quad \frac{h'}{h} = \frac{S}{S'} = \frac{F}{F'}$$

El trabajo resistente de la fuerza F' es, pues, $T' = F'h'$. Pero,

$$F'h' = Fh = T.$$

Luego el trabajo resistente es, abstracción hecha del roce, igual al trabajo motor.

Descripción. — En un cuerpo de bomba B (fig. 125 y 128), de gran diámetro y de paredes muy resistentes, se hace subir y bajar, con fro-

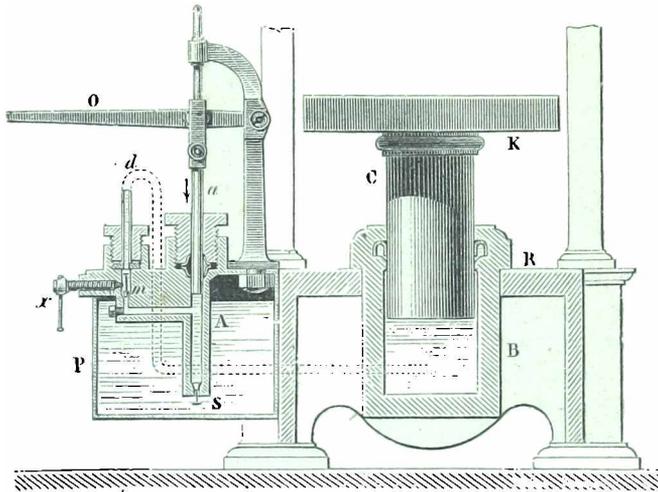


Fig. 125.

tamiento suave, un cilindro C que hace veces de émbolo. En las prensas pequeñas la ascensión del émbolo C se obtiene por medio de una bomba pequeña, cuyo émbolo *a* se maneja con una palanca O. Cuando sube el émbolo *a*, la válvula S se abre y el agua del depósito P se introduce en el cuerpo de bomba A; después, al bajar, esta válvula se cierra, y otra válvula *m*, que permaneció cerrada durante la ascensión del émbolo, se levanta a su vez por la presión de abajo arriba que experimenta, y el agua es impulsada hasta el cuerpo de bomba B por el tubo *d*. Esta levanta el émbolo mayor una pequeña cantidad, pero maniobrando de nuevo la bomba se pueden producir nuevas ascensiones del pistón mayor, que sube así progresivamente.



Fig. 126.

La filtración de agua entre el émbolo y el cilindro se evita con ayuda del *cuero embutido*. Dase este nombre a un cuero grueso, empapado en aceite e impermeable al agua y que, encorvado en forma de U invertida (fig. 126), se arrolla circularmente en una cavidad practicada en lo alto de la pared del cuerpo de bomba. Mientras más comprimida en éste se ve el agua, mejor aprieta el cuero, aplicándolo por una parte sobre la pared del cuerpo de bomba y por otra sobre el émbolo C.

En las prensas industriales un motor mecánico mueve la bomba. La figura 127 representa una de esas bombas, formada de dos bombas unidas P, P', que aspiran el agua por los tubos AA' de un recipiente y la impelen por el tubo R que se ajusta al orificio *d* de la prensa (fig. 128).

Las materias que se deben de prensar las comprime la prensa entre las dos planchas K y K'.

Cuando se ha obtenido el límite de presión, se le puede sobrepujar con un mecanismo imaginado por Desgoffes, y que consiste en un

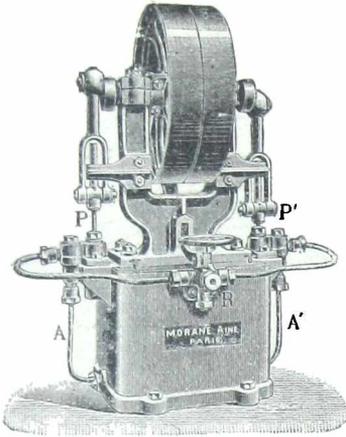


Fig. 127.

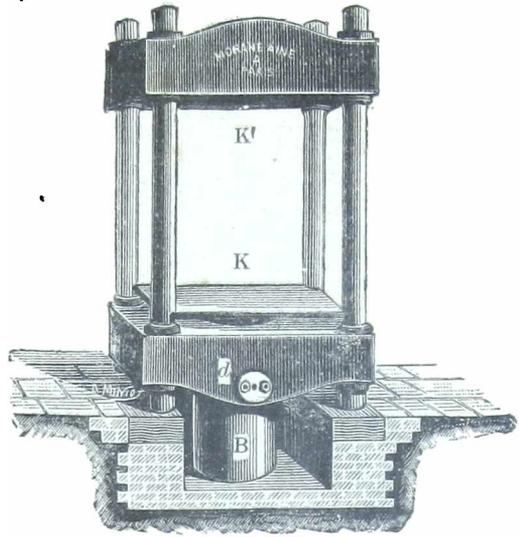


Fig. 128.

émbolo de inmersión que puede introducirse más o menos profundamente en el cuerpo de bomba y que se maneja por medio de una rueda grande con manubrios.

130. **Aplicaciones del agua bajo presión.** — 1º *Acumuladores hidráulicos.* — Las diversas aplicaciones del agua bajo presión se efectúan casi siempre por medio de *acumuladores hidráulicos*, que son recipientes donde se aloja el agua bajo presión. El recipiente tiene generalmente la forma de un cuerpo de bomba cilíndrico, en el que se mueve un pistón P (fig. 129) que sirve de fondo superior movable que se carga exteriormente de masas más o menos pesadas; arena, piedras o discos metálicos. Si Q es la suma de estas masas y S la superficie del fondo movable, la presión por unidad de superficie será $\frac{Q}{S}$: esta es la *fuerza del acumulador*.

El agua se introduce debajo del pistón, por el tubo A, por medio de una *bomba* como la de la figura 127; y una válvula de descarga, bien equilibrada, deja colar el exceso de agua una vez que se ha obtenido el límite de presión.

2º *Prensa de forjar.* — La prensa hidráulica se emplea en la industria para reemplazar al martinete.

La prensa de forjar tiene el aspecto de un pilón; pero el martinete, en vez de actuar cayendo sobre el bloque de metal sometido a la forja, está unido a un grueso émbolo de la prensa hidráulica. El trabajo de la prensa de forjar da un metal forjado con más regularidad que con el martinete de vapor; pero para la *forja*, vale más el martinete.

3º *Prueba de cadenas.* — Las cadenas de los navíos o de las máquinas para levantar grandes pesos son probadas en esta prensa. Para esto, se ejerce sobre el platillo del émbolo grueso una tracción algo superior al esfuerzo máximo que deben resistir.

4º *Prueba de calderas.* — Para probar una caldera de vapor, se la llena completamente de agua que se pone en comunicación con la bomba de una prensa hidráulica por medio de un tubo de acero. El agua de la caldera es comprimida hasta un límite superior a la presión que debe resistir la caldera. Esta prueba no es peligrosa, porque, siendo muy débil la compresibilidad del agua, si la caldera no resistiera, la menor cantidad de agua que saliera a consecuencia de la rotura, anularía la presión interior y no habría ninguna proyección peligrosa como ocurriría, por ejemplo, con el vapor de agua.

5° *Ascensores hidráulicos.* — La fuerza ejercida por el agua bajo presión se aplica a los ascensores hidráulicos. Entre los diversos sistemas empleados, citaremos el ascensor

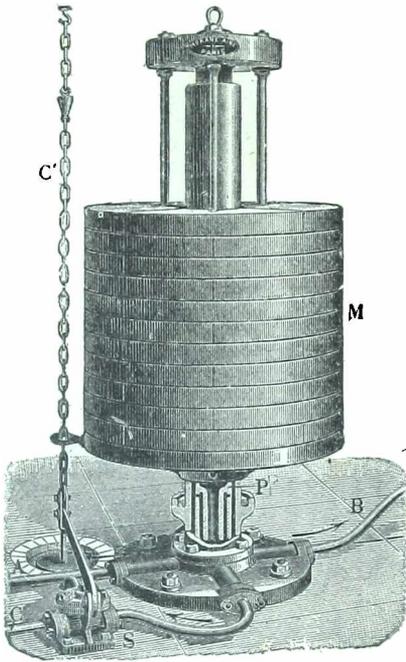


Fig. 129.

Edoux. Se compone de un largo émbolo de sumersión P (fig. 130) que tiene por longitud la altura que debe recorrer y soporta la caja del ascensor A. Se introduce en un cuerpo de bomba C, que es una especie de

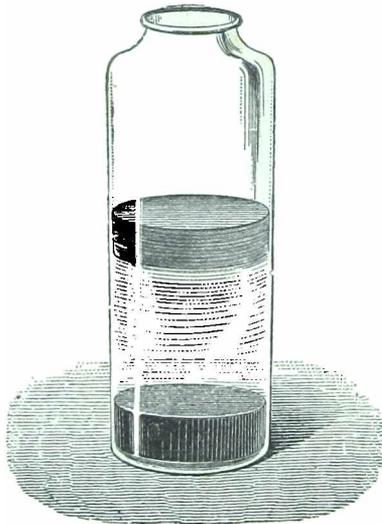


Fig. 131.

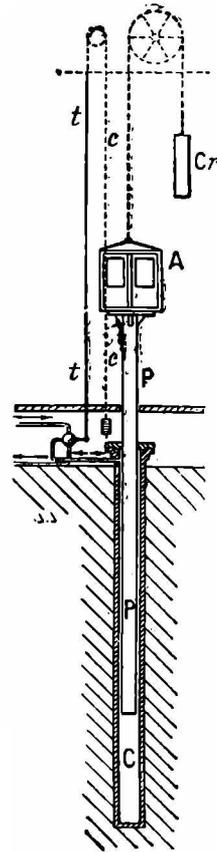


Fig. 130.

pozo, en el cual se inyecta el agua bajo presión de las cañerías de la ciudad, o bien, que se pone en comunicación con los grandes cilindros de un acumulador hidráulico. La presión de esta agua hace subir el émbolo y, por consiguiente, el ascensor. Para la bajada, basta suprimir el acceso del agua y hacer salir la del cuerpo de bomba que es expelida por el peso del sistema móvil. El grifo que permite el paso y la evacuación del agua acciona, desde el interior de la caja, por la cuerda *ct* que se tira en un sentido o en el contrario para producir la ascensión o la bajada de la caja móvil.

Cr es un contrapeso destinado a equilibrar el peso del émbolo y de la caja, a fin de que la presión del agua sólo tenga que vencer el peso de las personas transportadas.

131. Superficie libre de un líquido. — Líquidos y fluidos superpuestos. — Superficies de nivel. — Ya hemos demos-

trado (39), con un experimento exacto, que la superficie libre de un líquido (superficie de separación con el aire ambiente) es un plano horizontal.

Del mismo modo, si colocamos en un frasco (fig. 131) varios líquidos, por ejemplo, mercurio, agua y bencina, se superponen por orden de sus densidades decrecientes*, y ya veremos que las diversas superficies de separación son planos horizontales.

Demostración. — De este fenómeno puede darse una demostración basada en el principio fundamental. Supongamos dos fluidos de densidades diferentes. Llamemos d al fluido inferior y d' al superior. Supongamos, también, que su superficie de separación tenga una forma cualquiera (fig. 132) y tomemos dos puntos A y B en esta superficie. Sabemos que, en el plano horizontal AB', situado por completo en el fluido inferior, se ejerce la misma presión en todos sus puntos: llamemos p al valor de esta presión. Igualmente, la presión tiene el mismo valor p' en todos los puntos del plano horizontal BA' situado en el fluido superior. Sea h la diferencia de nivel entre BA' y AB'. Cuando se pasa de B a B', la diferencia de presión $p - p'$ es igual al peso hdg de una columna de líquido que tenga por base 1 centímetro cuadrado y por altura h . Si se pasa de A' a A, la misma diferencia de presión se expresa por el peso $hd'g$ de una columna de fluido superior de las mismas dimensiones. Por consiguiente, estos pesos tienen que ser iguales: de donde,

$$hd = hd'$$

Pero como se ha supuesto que d es diferente de d' esta igualdad sólo puede verificarse si el valor de h es cero, es decir, si los puntos A y B se hallan al mismo nivel. Como la demostración se aplica a todo par de puntos tomados en la superficie de separación, ésta debe ser un plano horizontal.

OBSERVACIONES. — 1ª La misma demostración se extiende al caso en que el fluido superior fuese un gas, como, por ejemplo, el aire ambiente.

2ª Si, por cima del líquido, existe el vacío, basta suponer, en lo que precede, $d' = 0$. Como la presión es nula en A y en B, deberá ser también nula en B', para lo cual es preciso que sea nula la altura BB'.

Caso de los líquidos miscibles entre sí. — Difusión de los líquidos. — Conviene notar que el estado de equilibrio de los líquidos sobrepuestos sólo es estable mientras éstos no pueden mezclarse unos con otros. De lo contrario, si son miscibles o, como generalmente se dice, *difusibles*, acaban por mezclarse espontánea e íntimamente. En esto consiste el fenómeno llamado *difusión de los líquidos* (339).

132. Vasos comunicantes. — Cuando el recipiente o vaso está formado de diversas partes que comunican entre sí, el teorema que precede puede demostrarse del mismo modo. De él se deduce que *las superficies libres en los diversos vasos están en el mismo plano horizontal.*

1º *Equilibrio de un solo líquido.* — Este fenómeno se comprueba por medio de dos probetas E y E' (fig. 133), que se comunican por un tubo de goma.

Se introduce agua o cualquier otro líquido en el sistema de los dos vasos, que se colocan después en posiciones cualesquiera. Se verá que, en todos casos, las superficies libres A'B' y AB del líquido en ambos vasos, se hallan en el mismo plano horizontal. La igualdad de los dos niveles puede verificarse con la alta precisión del catetómetro.



Fig. 132.

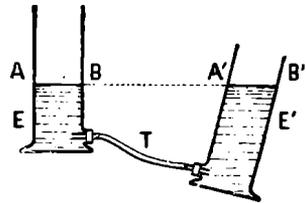


Fig. 133.

* En virtud del principio de Arquímedes (136).

2º *Equilibrio de dos líquidos heterogéneos.* — Vertamos cierta cantidad de mercurio en un tubo en U (fig. 134); después, en una de sus ramas, introduzcamos agua, que no se mezcla con el mercurio. Midamos las alturas h y h' de las dos superficies libres, por cima de la separación de los líquidos, y veremos que son entre sí como los números 1, 3, 6 y 1. Por consiguiente, el experimento demuestra que :

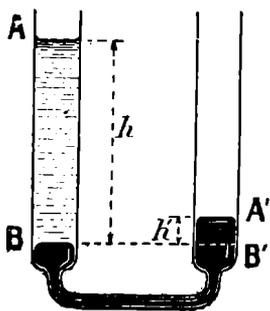


Fig. 134.

Las alturas de dos líquidos sobre su plano horizontal de separación están en razón inversa de sus densidades.

Demostración. — Las presiones que respectivamente ejerce en B un líquido de densidad d , y en B', en el mismo plano horizontal, otro líquido de densidad d' deben ser iguales; puesto que el plano BB' es un plano horizontal situado por completo en el mismo líquido en equilibrio. Pero, la presión ejercida por el líquido de la derecha es hdg , y la que imprime el líquido de la izquierda, $h'd'g$. Luego

$$hdg = h'd'g \quad \text{de donde} \quad \frac{h}{h'} = \frac{d'}{d}$$

APLICACIONES DIVERSAS

133. — *Nivel de agua.* — *Nivelación.* — El *nivel de agua* es un instrumento de agrimensura. Compónese de un tubo de latón o cobre, acodillado en sus dos extremos; en éstos se encuentran adaptados dos tubos de vidrio D y E (135) donde se echa agua á que se ha dado color hasta las 3/4 partes próximamente de su altura. El aparato entero

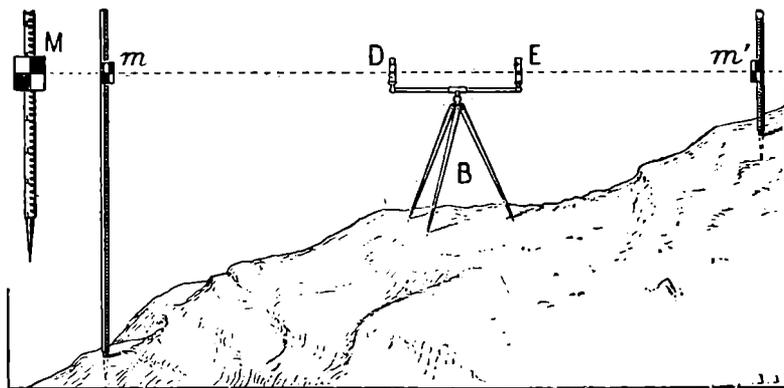


Fig. 135.

se dispone horizontalmente sobre un tripode. Una vez establecido el equilibrio según el principio de los vasos comunicantes, las superficies libres del líquido en D y E se encuentran en un mismo plano horizontal.

Este instrumento sirve para *hacer nivelaciones*, es decir para determinar la *diferencia de niveles* entre dos puntos.

Colocase en uno de los puntos del terreno una *mira*, que consiste en una regla de madera, graduada, por la que puede correr una placa de latón M, que tiene en su centro un punto de referencia. Un observador colocado junto al nivel dirige tangencialmente a las superficies D y E un rayo visual hacia la mira y hace seña al ayudante que la mantiene, de alargarla o acortarla hasta que el punto de referencia se encuentre en la línea DE. Transportando entonces la mira al otro punto, se repite la misma operación. La distancia entre la posición m' de la mira y la posición m da la distancia vertical de los puntos del terreno.

También se puede operar colocando el nivel en un sitio intermedio entre los dos puntos. Se dirige la visual a una mira colocada sucesivamente en esos dos puntos y la diferencia de las alturas en las dos ojeadas expresa la distancia vertical de los dos lugares que se consideran.

Una cualquiera de estas operaciones constituye la *nivelación simple*. Bastan en todos los casos en que los dos puntos están bastante cerca para que se pueda dirigir con precisión el rayo visual.

Nivelación compuesta. — Si los puntos están muy lejos, se establecen estaciones intermedias y se procede por nivelaciones sucesivas. La diferencia de nivel buscada es la suma de las nivelaciones parciales. Esta operación se llama *nivelación compuesta*.

134. **Nivel de burbuja de aire.** — Es un instrumento que consiste en

un tubo de vidrio apenas ensanchado en su punto medio, que se llena de un líquido muy fluido, como el alcohol o el éter, conservando dentro una pequeña burbuja del aire (fig. 136).

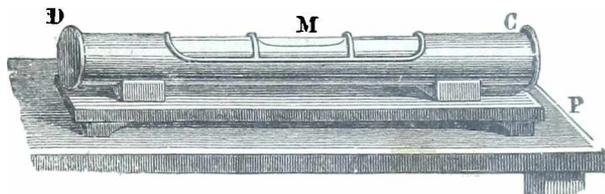


Fig. 136.

Cerrado este tubo soldándolo con la lámpara en sus dos extremidades, se le coloca en un estuche de latón CD que presenta un ancho corte por donde se ve la graduación hecha en la parte superior sobre el vidrio. El tubo metálico se fija ordinariamente en una regla del mismo metal, muy bien trabajada, que sirve de peana al instrumento.

Poniendo el nivel sobre un plano cualquiera, la superficie del líquido, queda perfectamente horizontal, y la burbuja de aire va a colocarse en la parte más alta del tubo. Luego la línea ideal que uniría sus extremidades es una línea horizontal, sea cual fuere



Fig. 137.

la orientación del plano del apoyo. Si este plano es horizontal, la burbuja de aire va a colocarse entre dos marcas aa' (fig. 137) donde se ponen, generalmente, dos OO, que serán siempre las mismas cada vez que el nivel esté en un plano horizontal. La línea- aa' u O O se llama la *línea de nivel*.

1º *Usos*. — Cuando el nivel debe servir para hacer horizontal un plano, su armadura presenta base horizontal que se coloca sobre una recta cualquiera del plano. Éste es de ordinario un tripode en forma de triángulo, provisto de tres tornillos de nivel (fig. 138). Empiézase por disponer el aparato paralelamente a la dirección de las cabezas de los tornillos (fig. 138, I) y se da vueltas a éstas hasta que la burbuja vaya a colocarse entre sus líneas de referencia: en este momento la base del nivel y, por consiguiente, la línea del plano de apoyo, que coincide con la base, es una horizontal. Hecho esto, se pone el nivel en una posición sensiblemente perpendicular a la primera (fig. 138, II), y se

hace horizontal esta dirección dando vueltas al tercer tornillo del plano. Si esta segunda operación no ha alterado la horizontalidad de la línea de los otros dos tornillos, puede deducirse que el plano es horizontal, toda vez que contiene dos líneas horizontales. Pero,

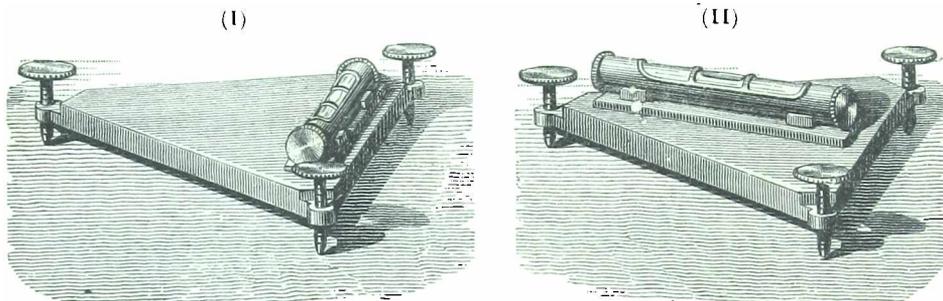


Fig. 138.

en general, la primera horizontal se ha inclinado más o menos durante la segunda operación. Entonces se empieza de nuevo la primera operación y luego la segunda, metódicamente, hasta que el resultado de una de ellas no se altere por efecto de la otra, y así se llega con bastante rapidez a la horizontalidad permanente de las dos direcciones: entonces el plano de apoyo es *horizontal*.

2º *Comparador de nivel*. — Para medir la inclinación de una recta o de un plano inclinados sobre el horizonte hay que conocer el valor angular de una división de la escala del nivel. Efectuase esta graduación previa de manera empírica, con ayuda de un aparato especial que se llama *comparador de nivel*. Este aparato se compone de un plano móvil en torno de un eje horizontal, y cuya inclinación puede modificarse cantidades conocidas a voluntad, comunicándolo su movimiento por medio de un tornillo micrométrico vertical, provisto de un tambor graduado como el del esferómetro.

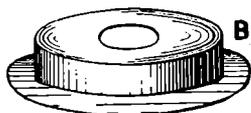


Fig. 139.

3º *Nivel esférico*. — Para regular rápidamente la horizontalidad de un plano, se emplea, muy a menudo, con el nombre de *nivel esférico*, un pequeño aparato que consta de una especie de caja cilíndrica B (fig. 139), cuya cara superior es una lámina de vidrio en forma de casquete esférico. El nivel se halla lleno incompletamente de líquido, y la burbuja que en él queda ocupa siempre la parte más elevada. Se construye el aparato de modo que, cuando el plano en que se fija es horizontal, la burbuja quede en el centro de la lámina de cristal, donde se ha marcado su contorno con un trazo circular.

135. **Aguas corrientes. — Distribución del agua en las ciudades. — Saltos de agua. — Pozos. — Manantiales. — Pozos artesianos. —** Los

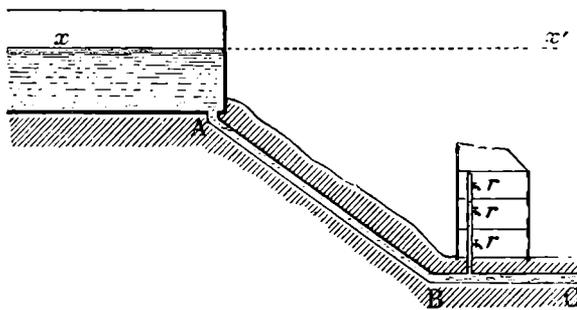


Fig. 140.

mares, manantiales y ríos son otros tantos vasos comunicantes, en los cuales las aguas tienden sin cesar a adquirir el mismo nivel.

Lo mismo ocurre con la traída de aguas en las poblaciones. La figura 140 representa el esquema de la disposición de tal traída. El agua se acumula en depósitos de los cuales parten cañerías A, B, C, que los ponen en comunicación con los locales a que deben abastecer. En cada

edificio existe una cañería unida a la tubería que pasa por las calles. En aquélla, se hallan instalados los distintos grifos *r* que sirven para la extracción del agua. Para que el agua pueda llegar a un grifo, es preciso y basta que éste se encuentre debajo del nivel *xx'* del agua en el depósito.

Salto de agua.— Supongamos que un depósito *c* (fig. 141) comunique, por un tubo con grifo, con un tubo colocado más bajo que el nivel del agua en *c*. El líquido ejerce presión sobre el grifo — que se supone cerrado —. Si se abre este grifo, el agua saldrá verticalmente, en virtud de dicha presión. La altura del salto debería ser igual a *cd*; pero se halla más o menos disminuida por el frotamiento del agua contra las paredes del tubo y por la resistencia del aire.

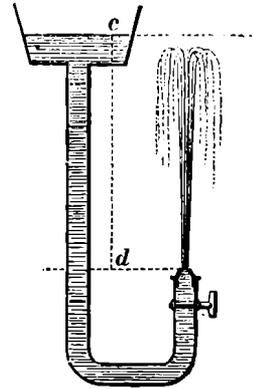


Fig. 141.

Manantiales y pozos. — *Pozos artesianos.* — El agua de lluvia que cae al suelo se infiltra a través de los terrenos *permeables*; pero queda detenida por las capas *impermeables*, tales como las arcillas. Además, encima de las capas impermeables, existen *venas acuíferas*. La figura 142 representa el corte esquemático de una cuenca geológica, con diversas capas impermeables. En los puntos *S, S*, adonde van a parar las capas impermeables, se producen *manantiales*. Por otra parte, si se practican pozos, tales como *P'*, que lleguen a las capas acuíferas, el agua subirá, en estos pozos, hasta el nivel que tiene en la vena. Tales son los pozos ordinarios. Pero, si ocurre que una vena acuífera quede comprendida entre dos capas impermeables *AB* y *CD*, de modo que el nivel del agua se halle encima del punto *P* del suelo, y se

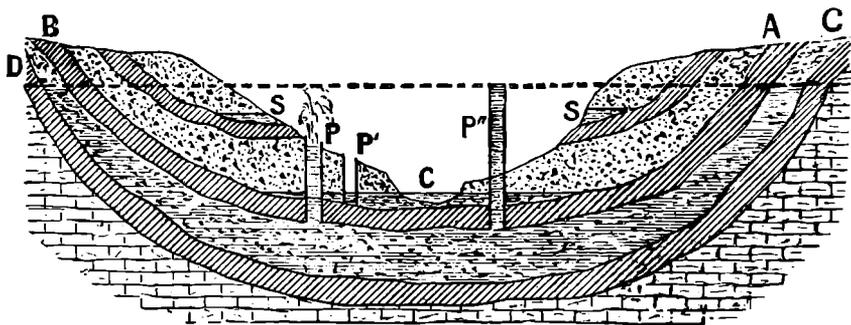


Fig. 142.

practica en *P* un pozo que encuentre la vena, el agua brotará en la superficie del suelo. Estos pozos se denominan *pozos artesianos**. Semejantes pozos se construyen con bocas muy estrechas, perforadas con

* Así llamados porque fueron practicados, por primera vez, en la antigua provincia francesa de Artois, en la cual se encuentran algunos cuyo origen parece remontarse a fines del siglo *xii*. En época mucho más remota, se practicaron pozos de esta clase en China y en Egipto.

sondas. A veces, se los corona con un tubo P'' en el cual el agua se eleva hasta al mismo nivel que en la vena.

Iguales circunstancias ofrece la cuenca parisiense, y se han abierto varios pozos artesianos: pozo de Grenelle (profundidad 548 metros), de Passy (587 m.), de la Butte aux Cailles (582 m.), de la Chapelle (719 m.), de Vincennes (599 m.), de Maisons-Laffitte (576 m.).

PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES. — CUERPOS FLOTANTES

136. **Principio de Arquímedes.** — Cuando un cuerpo sólido está enteramente sumergido en un líquido en equilibrio, las presiones que se ejercen en su superficie tienen una resultante única, igual y directamente opuesta al peso del volumen líquido desalojado, y que pasa por el centro de gravedad de este volumen.

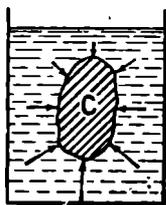


Fig. 143.

Esta resultante se llama el empuje del líquido; su punto de aplicación es el *centro de empuje*.

Arquímedes descubrió este principio, que se enuncia también de la manera siguiente:

Todo cuerpo sumergido en un líquido en equilibrio sufre en él un empuje vertical de abajo arriba, igual al peso del volumen líquido desalojado.

Demostración de Stevin. — Consideremos en una masa líquida en equilibrio una porción de líquido de forma cualquiera y supongámosla solidificada (fig. 143). Es evidente que la parte solidificada de este modo soportará, de parte de la masa líquida, las mismas presiones que antes y que, por consiguiente, seguirá estando en equilibrio, lo que no puede ocurrir sino porque soporta, de abajo arriba, un empuje igual a su peso. Ahora bien, si en lugar de la parte solidificada se imagina un cuerpo de otra sustancia, del mismo volumen y de análoga forma soportará necesariamente las mismas presiones que soportaba el líquido solidificado, y, en consecuencia, estará sometido también él a

un empuje igual al peso del líquido desalojado.

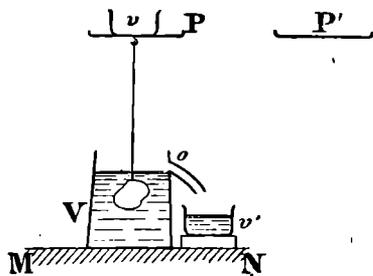


Fig. 144.

Experimento. — *Dispositivo de M. Boudréaux.* — Se cuelga un peso en el platillo de una balanza donde se haya colocado un vaso v (fig. 144). Levantando un vaso V provisto de un orificio o y colocado en un soporte de crema-

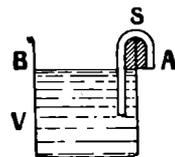


Fig. 145.

llera, se sumerge el cuerpo, que expulsa un volumen de agua igual al suyo. Se recoge esta agua en un vaso v' del mismo peso que v ; el platillo P sube por efecto del empuje. Sustituyendo en la balanza el vaso v por el vaso v' , se restablece el equilibrio, lo cual demuestra evidentemente el principio.

Es ventajoso sustituir el vaso de Boudréaux por un pequeño sifón (211), cuya rama mayor penetre en el agua del vaso y cuya rama pequeña desemboque en el exterior (fig. 145). Una vez lleno el vaso, al apretar el sifón, el agua se derrama hasta que su nivel en el vaso, esté exactamente en el plano horizontal del extremo del sifón. A partir de este momento, si se sumerge un cuerpo en el vaso, desalojará un volumen de agua rigurosamente igual al suyo. El experimento es más exacto y rápido que empleando el mecanismo anterior.

137. Recíproca del principio de Arquímedes. — *Todo cuerpo sumergido en un líquido en equilibrio, parece que ejerce sobre el vaso que contiene este líquido una fuerza vertical dirigida de arriba abajo, igual al peso del volumen líquido desalojado.*

Para demostrarlo se pesa el vaso (fig. 146) lleno de líquido y el vaso v' vacío y luego se sumerge el cuerpo pendiente de un hilo AB. El platillo P baja, al mismo tiempo que el vaso v' recide un volumen del líquido igual al del cuerpo. Para restablecer el equilibrio, no hay más que vaciar el vaso v' y ponerle en su sitio.

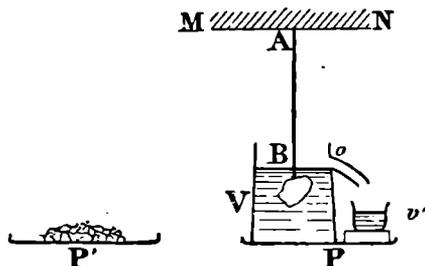


Fig. 146.

La explicación de este hecho es muy sencilla. Desde luego se puede observar que cuando se sumerge un cuerpo en un líquido, se eleva el nivel en el vaso; la resultante de las fuerzas sobre las paredes aumenta, pues, en la misma cantidad que si se hubiera añadido un volumen de líquido igual al del cuerpo sumergido.

138. Determinación del volumen de un cuerpo. — El principio de Arquímedes proporciona medios de obtener con precisión el volumen de un cuerpo, por irregular que sea su forma, cuando no es soluble en el agua ni la absorbe. Para eso, se suspende el cuerpo con un hilo debajo del platillo de una balanza y se le pesa; después se le sumerge en un vaso lleno de agua. Para establecer el equilibrio, hay que añadir, en el platillo, un número de gramos, que da, en centímetros cúbicos, el volumen del cuerpo. Por ejemplo, si se han añido 27,35 g., quiere decir que el volumen del sólido es 27,35 cm³.

OBSERVACIÓN. — Esto no es exacto sino cuando el agua está a 4°. Si está a una temperatura cualquiera t , y si la masa añadida es m , el volumen del agua, y por consiguiente del cuerpo, es $\frac{m}{d}$, siendo d la densidad del agua a t° . Es preferible servirse del agua a 0°, cuya densidad es 0,9998.

139. Equilibrio de los cuerpos sumergidos y de los cuerpos flotantes. — Según el principio de Arquímedes, todo cuerpo sumergido en el líquido está sometido a dos fuerzas verticales y de sentidos contrarios: su peso P, aplicado en su centro de gravedad G y el empuje P' aplicado en el centro de empuje G' (fig. 147). Si el sólido y el líquido son cuerpos homogéneos, los centros de gravedad del volumen común

que ocupan en el espacio coinciden necesariamente y las fuerzas P y P' están directamente opuestas. Si uno de los cuerpos no es homogéneo, lo cual ocurre generalmente, sus puntos de aplicación G y G' son distintos. Como las fuerzas P y P' son paralelas y de sentidos contrarios, tienen siempre una resultante igual a su diferencia ($P - P'$). Hay que considerar tres casos :

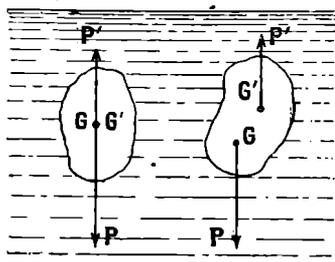


Fig. 147.

1º $P > P'$. El cuerpo cae al fondo del líquido, arrastrado por la fuerza ($P - P'$). Si el sólido es homogéneo se presenta este caso cuando la densidad D del sólido es superior a la densidad D' del líquido ($D > D'$).

2º $P = P'$ (o $D = D'$). El cuerpo permanece en equilibrio en el líquido, con tal, sin embargo, de que esté orientado de manera que las dos fuerzas iguales sean directamente opuestas.

3º $P < P'$ (o $D < D'$). El cuerpo vuelve hacia la superficie libre, con movimiento uniformemente acelerado, impulsado por la fuerza constante ($P' - P$). A partir del momento de la inmersión, el empuje decrece a la vez que el volumen del líquido desalojado disminuye. El cuerpo llega necesariamente a una posición en que $P' = P$. Pasa de esta posición en virtud de la energía cinética adquirida, volviendo a ella por causa de su peso y acabando por quedar fijo allí después de una serie de oscilaciones más o menos numerosas. Entonces se dice que el cuerpo *flota*; este es un *cuerpo flotante en equilibrio*. La cera, la madera, y todos los cuerpos más ligeros que el agua flotan en su superficie. Análogamente, una masa de hierro, que caería en seguida al fondo del agua, sobrenada en un baño de mercurio.

140. **Condiciones de equilibrio de los cuerpos flotantes. — Meta-centro.** — Para que un cuerpo flotante permanezca en equilibrio debe realizar dos condiciones :

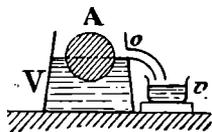


Fig. 148.

1º *El peso del líquido desalojado debe ser igual al peso del cuerpo*; esta condición es evidente, según lo que acabamos de decir.

Se comprueba fácilmente, por medio del vaso bien lleno de M. Boudréaux. Se sumerge en él un cuerpo flotante A (fig. 148), que desaloja cierto volumen de líquido. Se recoge este líquido en el vaso v y se ve que su peso es precisamente igual al del cuerpo flotante.

2º *El centro de gravedad del cuerpo y el centro de empuje del líquido deben estar en la misma vertical.*

En efecto, si no se cumpliera esta condición, como la primera se cumple, las fuerzas iguales P y P' (fig. 149, II, y III) formarían un par (32) que haría girar al cuerpo hasta que los puntos G y G' se colocasen en la misma vertical (fig. 149, I), y el cuerpo no quedaría en equilibrio sino después de una serie de oscilaciones.

Estabilidad del equilibrio. — En caso de que la forma de la parte sumergida no cambie cuando el cuerpo se desaloje, es necesario, para que el equilibrio sea estable, que el centro de gravedad se halle debajo del centro de empuje.

La figura 149 representa un tubo de cristal, cuya parte inferior lleva adherido un cuerpo pesado, a modo de lastre*. De esta manera, el centro de gravedad se halla hacia la parte pesada. En la primera posición, en que el centro de gravedad se halla más bajo que el de empuje el cuerpo permanece en *equilibrio estable*.

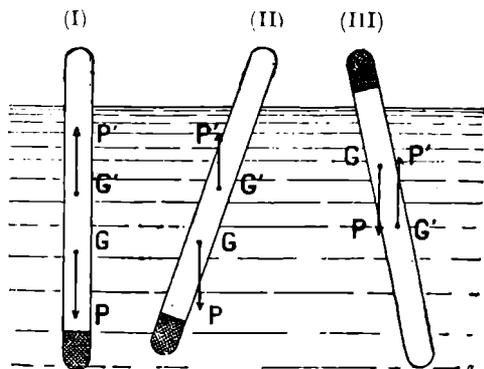


Fig. 149.

En efecto, si se la aparta un poco de esta posición, el cuerpo y el empuje forman un par que tiende a devolver al cuerpo su primitiva posición. Al contrario, en la posición en que el centro de gravedad se halle en la misma vertical que el centro de empuje, pero encima de éste, el equilibrio se realiza teóricamente; pero es *equilibrio inestable*, porque si se separa un poco el cuerpo de esta posición, las fuerzas P y P' le conducirán a la posición anterior. Por otra parte, este caso es irrealizable.

141. *Metacentro.* — *Equilibrio de los barcos.* — En caso en que cambie [la forma de la parte sumergida, al desplazarse el cuerpo, la estabilidad depende del lugar que ocupa, en la vertical que pase por el centro de gravedad en la posición de equilibrio considerada, un punto particular llamado *metacentro*.

Sea ABC (fig. 150) la sección de un cuerpo flotante, como, por ejemplo, un navio cortado por un plano que pase por la vertical xy , donde están situados el centro de gravedad g del navio y el centro de empuje c del líquido desalojado en la posición de equilibrio normal. Cuando el navio se inclina tomando la posición A' B' C', la línea xy pasa a $x'y'$, y el centro de gravedad, que no cambia respecto del navio, va de g a g' , mientras que, como la forma del líquido desalojado ya no es la misma, el centro de empuje cambia respecto del navio, y toma, por ejemplo, la posición c' . Tracemos, por el punto c' una vertical que corte a la recta $x'y'$ en m , este punto es el llamado *metacentro*.

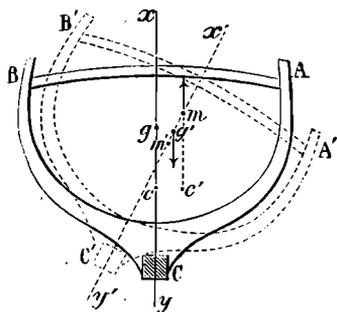


Fig. 150.

La condición de estabilidad es la siguiente: *El cuerpo está en equilibrio estable cuando el metacentro está por encima del centro de gravedad del cuerpo flotante; y en equilibrio inestable cuando el metacentro está por debajo.*

En efecto, se puede transportar el punto de aplicación del empuje c' a m , y si el punto m está situado por debajo del punto g' , es evidente que las fuerzas aplicadas en m y en g' tendrán por efecto volver al navio a su primera posición ABC, y por consiguiente *el equilibrio será estable*. Si, por el contrario, el punto m está por debajo del centro de gravedad, las dos fuerzas tendrán por efecto hacer zozobrar al navio, y *el equilibrio será inestable*.

* Se pueden poner, por ejemplo, perdigones con un poco de parafina, todo fundido. Cuando la parafina se solidifica, inmoviliza el plomo.

142. **Barcos submarinos.** — Los navíos submarinos, o *sumergibles*, son capaces también de navegar en la superficie o en el seno del mar. Su tonelaje es reducido: 540 toneladas, en sumersión, para los barcos del tipo *Pluviöse*, 800 para el *Archimède*. Se entra en estos navíos por aberturas que pueden cerrar unas capotas, estancos CC (fig. 151). El casco de los submarinos es doble; el exterior presenta la forma requerida para que pueda navegar en la superficie; el interior es muy sólido para que pueda resistir a la presión del agua mientras está sumergido (la figura 151 representa en T la sección transversal de un sumergible tipo *Pluviöse*). El intervalo de los dos cascos está dividido en compartimientos, algunos de los cuales, situados en los extremos, se llaman *water-ballast* (lastre de agua), porque haciendo que entre en éstos el agua del mar, el navío se hace más pesado y se le puede sumergir. Para hacerle subir se envía a los *water-ballast* aire comprimido que arroja el agua afuera.

Propulsión. — En la superficie, los submarinos navegan por medio de una hélice movida por una máquina de vapor o por un motor de combustión interna (356). Cuando está sumergido, la hélice es movida por un motor eléctrico, que recibe la corriente de una batería de acumuladores. Estos se cargan, durante la navegación en la superficie, por una dinamo movida por la máquina motriz.

Timones de profundidad. — Una vez sumergido, el navío no puede por sí mismo permanecer a nivel invariable; si es muy pesado, se hunde, si es muy ligero sube. Se le

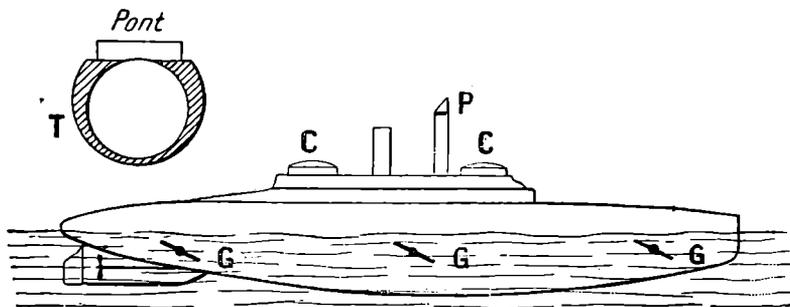


Fig. 151.

puede sostener a una altura fija mediante timones de profundidad G, cuyo eje es horizontal y se manejan desde el interior. Si se les da vuelta de manera que durante la marcha el agua los empuje por debajo, la resistencia del agua tiene una componente vertical, dirigida hacia abajo, la cual se añade al peso del navío. Si, al contrario, se les da vuelta de modo que el agua los empuje por encima, la componente de la resistencia del agua va dirigida hacia arriba. Luego por medio de maniobras convenientes de los timones de profundidad, se puede sostener el navío a una profundidad constante, o hacer que suba o que baje.

Periscopios. — Estos aparatos permiten ver dentro del submarino lo que pasa afuera. Un periscopio P (fig. 151) comprende un tubo que rebasa la superficie del agua y que termina en un prisma de reflexión total (522), el cual envía al interior del tubo los rayos luminosos procedentes de los objetos exteriores; un sistema óptico da una imagen neta de los objetos, y el comandante puede verla dentro del navío.

Dispositivos de seguridad. — El accidente más grave que puede ocurrir al submarino, es la penetración de agua en su interior, o simplemente en los compartimientos de doble fondo; por ejemplo a consecuencia de una colisión que haya provocado un boquete en las paredes. El submarino lleva por fuera grandes pesos de plomo que pueden ser desprendidos desde dentro, a fin de aligerar el navío y permitirle que suba, a pesar del aumento de su peso provocado por el accidente. Por desgracia este medio es insuficiente cuando la cantidad de agua que haya entrado en el navío es grande, y entonces ya no puede subir a flote por sus propios medios. De modo que la navegación submarina entraña aún grandes riesgos.

CAPÍTULO II

MEDIDA DE LAS DENSIDADES DE SÓLIDOS Y LÍQUIDOS.
AREÓMETROS

143. **Medida de la densidad de los cuerpos.** — Ya hemos definido lo que se llama densidad de un cuerpo (58). Para medirla, basta medir la masa del cuerpo, por una pesada ordinaria; luego, su volumen, mediante una probeta graduada en parte de igual capacidad, y finalmente, hallar el cociente de los dos números que resulten.

Si se trata de un líquido, la medida de su volumen se obtiene directamente, vertiendo el líquido en el vaso graduado y leyendo la división con que su superficie coincide.

Tratándose de sólidos, se vierte el agua en la probeta, se señala el punto adonde su superficie llegue y se introduce el cuerpo de modo que quede completamente sumergido. El nivel del agua se eleva, y hasta leer otra vez el punto adonde llega su superficie, para obtener el volumen del cuerpo.

Para operar con mayor precisión, mídese la densidad de un cuerpo *con relación al agua*. A este efecto, se mide la masa de un volumen determinado del cuerpo y la masa de un volumen igual de agua y se divide el primer resultado por el segundo.

144. **Densidad de los sólidos.** — Se toma un frasco pequeño, que se llena de agua hasta una división señalada en su cuello, y se lo coloca en el platillo de una balanza, poniendo, a su lado, el cuerpo cuya densidad se busca. Se efectúa la tara en el otro platillo, luego se retira el cuerpo y reemplázasele por pesas, hasta restablecer el equilibrio de la balanza. De este modo, por doble pesada, tenemos el peso de la masa M del cuerpo. Después, se sacan las pesas e introdúcese el cuerpo en el frasco; luego, se restablece el alcance del líquido hasta su nivel primitivo; lo cual, evidentemente, necesita la supresión de un volumen de agua igual al del cuerpo. Si se vuelve a colocar el frasco en el mismo platillo, hará falta, para restablecer el equilibrio, añadir, a su lado, pesas de masa M' , que representarán la masa de agua extraída. El cociente de los dos números M y M' así hallados nos dará la densidad buscada $d = \frac{M}{M'}$.

Discusión de los errores. — Estos experimentos están sujetos a dos clases de errores: uno depende de la sensibilidad de la balanza, el otro, de que, al llenar el frasco las dos veces sucesivas, no se habrá colocado exactamente el nivel en el mismo punto. En el resultado, el error es tanto mayor cuanto menos sensible es la balanza y más ancho el cuello del frasco. Para atenuarlo, úsese una balanza sensible y, *al mismo tiempo*, un frasco de cuello estrecho.

1. Pues no tendría gran objeto el escoger una balanza sensible y operar con un frasco do ancho gollote, toda vez que el error producido por éste excedería en mucho al de la

Aparato. — Se emplea un frasco de gollote lo suficientemente ancho para que pueda pasar por él el cuerpo. Está cerrado con un tapón de vidrio esmerilado, taladrado por un agujero en el cual encaja un tubo que se prolonga en un tubito capilar terminado en otro tubo corto, pero de gran diámetro (fig. 152). En el tubito se halla marcado un punto de referencia *a* hasta donde debe llenarse el frasco, en cada operación, para lo cual, basta **tapar** éste cuando se encuentra completamente sumergido en el agua. El nivel sube, entonces, por encima de *a*; pero se gradúa extrayendo el agua sobrante por medio de papel de filtrar.



Fig. 152.

Corrección del empuje atmosférico. — En las medidas de precisión, se debe corregir el empuje atmosférico en las pesadas, como veremos más adelante (181).

Corrección de la temperatura. — La densidad de un cuerpo varía con su temperatura (246). Por esta razón, se ha convenido medir la densidad de los cuerpos a 0°. Para esto, cada vez que se llena el frasco, se sumerge en hielo derretido y no se establece su alcance al punto de referencia hasta que esté a la temperatura de 0°. De este modo se mide la relación $\frac{M}{M_0} = \delta_0$ de la masa del cuerpo a la masa del mismo volumen de agua a 0°, que es la densidad del cuerpo a 0° respecto al agua a 0°.

Sea, ahora, d_0 la densidad absoluta del cuerpo; entonces tenemos

$$d_0 = \frac{M}{V_0}$$

siendo V_0 el volumen del cuerpo a 0°. Pero se puede escribir

$$d_0 = \frac{M}{M_0} \times \frac{M_0}{V_0}$$

$\frac{M}{M_0}$ es la densidad δ_0 relativa al agua a 0°, en cuanto a $\frac{M_0}{V_0}$ es la densidad absoluta del agua a 0°, 0,99984. Luego $d_0 = \delta_0 \times 0,99984$.

Siendo el número 0,99984 casi 1, para cálculos que no requieran gran precisión se toma $d_0 = \delta_0$.

Caso de cuerpos solubles en el agua. — Si el cuerpo es soluble en el agua, se toma su densidad con relación a un líquido en que no sea soluble. Luego, se busca la densidad del líquido auxiliar (145) y se efectúa el producto de ambos resultados.

En efecto, sean M la masa del cuerpo y M'' la masa de un volumen igual del líquido auxiliar. Se determina la densidad $D' = \frac{M}{M'}$ del cuerpo con relación al líquido. La verdadera densidad $D = \frac{M}{M}$ es igual a $\frac{M'}{M''} \times \frac{M''}{M}$. El cociente $\frac{M''}{M}$ es la densidad D'' del líquido. Luego $D = D' \times D''$.

Para el azúcar, por ejemplo, se procederá por el método del frasco, bien con aceite de oliva, bien con esencia de trementina, líquidos ambos en que es insoluble el azúcar.

Caso de cuerpos alterables por los líquidos. — Si se trata de un cuerpo alterable, como la pólvora de guerra o de caza, se determina, en primer lugar, la masa M del cuerpo; luego su volumen V , sin ponerlo en contacto con ninguno de los líquidos usuales. La densidad es igual al cociente $\frac{M}{V}$. Se puede medir el volumen de una masa M de pólvora por el de mercurio que ésta desplaza, una vez desprovista, en el vacío, de las burbujas gaseosas que retiene condensadas.

145. Densidades de los líquidos. — En uno de los platillos de la balanza, se coloca una tara compuesta de un peso bastante grande, y

balanza. Inversamente, sería inútil tomar un frasco de cuello estrecho si la balanza empleada fuese poco sensible.

en el otro un frasco lleno de aire, añadiendo pesas para equilibrar, la tara.

Después, se llena el frasco de líquido y se vuelve a colocar en el platillo. Para restablecer el equilibrio basta retirar una parte M de las pesas : M es la masa del líquido que llena el frasco.

* Después de colocar de nuevo las pesas que se acaban de sacar, se vacía el frasco, se limpia esmeradamente y llénase de agua. Luego, se le deja otra vez en el platillo. Para restablecer el equilibrio, hay que extraer una masa M' , que es la masa de un volumen de agua igual al del frasco.

El cociente de estas dos masas es la densidad buscada.

Aparato. — Para operar con mayor precisión, se utiliza un pequeño frasco de forma especial (fig. 153), que se compone de un depósito cilíndrico b al que se halla soldado un tubo delgado que contiene un punto de referencia c , y termina en un tubo más grueso a , que puede cerrarse con un tapón de vidrio (cuando se traten líquidos volátiles)*.



Fig. 153.

OBSERVACIONES. — Cuantas observaciones hemos hecho respecto a la medida de la densidad de los sólidos se aplican también a las densidades de los líquidos.

Especialmente, en las medidas de precisión se llena dos veces el frasco a 0° como se explicó para los sólidos.

146. Aplicación del principio de Arquímedes a las medidas de densidades. — Balanza de Mohr.

1.º *Sólidos.* — Se puede medir la densidad de un sólido, de la manera siguiente : Se le suspende del platillo de una balanza y se efectúa su tara. Se descuelga el cuerpo y se le sustituye por pesas, que dan la masa M de aquél.

Retíranse estas pesas y, reemplazando el cuerpo, se coloca bajo él un vaso lleno de agua en el cual se lo sumerge. El equilibrio queda deshecho y para retablecerlo, se debe introducir una masa M' en el platillo de que está suspendido. En virtud del principio de Arquímedes, esta masa M' representa la masa de agua que ocupa el mismo volumen que el cuerpo. Luego la densidad de éste es $\frac{M}{M'}$.

2.º *Líquidos.* — Para determinar la densidad de un líquido, se suspende, debajo del platillo de la balanza, una bola hueca, de vidrio, que contenga mercurio, de manera que pueda sumergirse en el líquido y en el agua. Se hace la tara y se introduce la bola en el líquido. Para restablecer el equilibrio hay que añadir M gramos al platillo. Esto demuestra que la masa de un volumen del líquido igual al volumen de la bola es también igual a M . Se quita este peso y se vuelve a empezar la operación sumergiendo la bola en el agua. Los pesos que hay que añadir, esta vez, al platillo, dan la masa M' de un volumen de agua igual al volumen de la bola. La densidad del líquido se obtiene hallando el cociente de los dos números encontrados.

Este procedimiento se aplica cómodamente por medio de balanzas modificadas para este uso especial (balanza de Mohr perfeccionada por Westphal y Reimann).

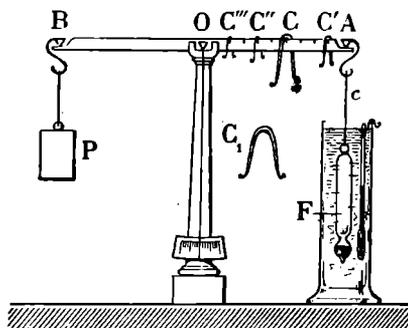


Fig. 154.

* Para que el líquido penetre a través del tubo estrecho, introdúcese en el depósito b , un tubo de vidrio prolongado que desemboca al exterior y por el cual sale el aire del frasco.

La balanza de Mohr se compone de un fiel AB (fig. 154) móvil alrededor de un cuchillo O. Del extremo A, se halla suspendido, por un alambre muy fino, un flotador de vidrio F, con lastro suficiente para que pueda sumergirse en los diversos líquidos que se quiera estudiar. Del extremo B, hay suspendido un contrapeso P, que equilibra al flotador cuando éste se halla en el aire. El brazo del fiel OA está dividido por rayitas equidistantes, en 10 partes iguales. A la balanza va unido un sistema de cuatro caballitos C, C', C'', C'''. La masa de C es tal que, cuando el flotador se introduce en agua a 15°, si se lo coloca en A, equilibra el empuje del agua sobre el flotador. C' tiene una masa 10 veces menor, C'' una masa 10 veces más pequeña que C', etc. Supongamos un líquido de densidad inferior a 1. Coloquémoslo en una probeta con un termómetro, e introduzcamos en él el flotador F. Para equilibrar el empuje, se colocan sucesiva y metódicamente los jinetes C, C', C'', C''' hasta que se restablezca el equilibrio de la balanza. Si, por ejemplo, hemos colocado a C en la división 6 (a partir de 0), a C' en la división 9, a C'' en la 4 y a C''' en la 2, la densidad del líquido a la temperatura a que se experimente, y con relación al agua a 15°, es 0,6942. Para obtener la verdadera densidad del cuerpo a la temperatura a que se realiza el experimento, hay que multiplicar el número hallado por la densidad de agua a 15°, o sea, por 0,99916.

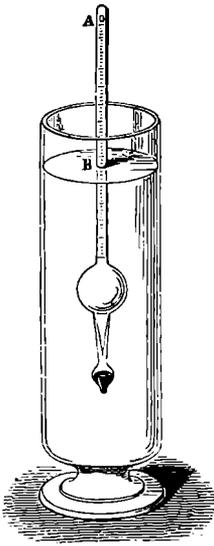


Fig. 155.

Para líquidos de densidad comprendida entre 1 y 2, se empieza por colocar en el gancho c, un caballito C₁, de la misma masa que C. Los demás caballitos darán las cifras decimales.

147. Areómetros. — Densímetros. — Los areómetros son flotadores de cristal, formados por una varilla cilíndrica a la cual va soldada una cavidad esférica (fig. 155) o cilíndrica (fig. 157), llena de aire, seguida, a su vez, de una bola más pequeña, que contiene mercurio, a manera de lastre. Sumergido este aparato en un líquido, se introduce de tal modo que su peso sea igual al peso del líquido que desplaza. Por tanto, deberá introducirse tanto menos cuanto más denso sea el líquido.

Densímetros. — Los densímetros son areómetros que se hallan graduados de manera que den, por una simple lectura, la densidad del líquido. La densidad desconocida queda determinada por la división a que

llega la superficie del líquido.

Graduación absoluta. — Para graduar un densímetro se le sumerge sucesivamente en dos líquidos de densidades conocidas D y D' y se notan los puntos de alcance B y A (fig. 155). Se escogen líquidos cuyas densidades sean aproximadas: una, a la mayor densidad que deba medir el aparato; y la otra, a la más pequeña. Se mide la distancia l de A a B. El problema de la graduación se reduce a calcular la distancia x de B, a que se debe marcar una densidad d, intermedia entre D y D'.

Sean V el volumen de la parte inferior del aparato hasta B y s la sección de la varilla. La masa m del aparato, en la posición de equilibrio, es siempre igual a la masa del líquido desalojado. Es decir que tendremos:

$$1^\circ \text{ en el líquido de densidad } D, \quad m = VD; \tag{1}$$

$$2^\circ \text{ en el líquido de densidad } D', \quad m = (V + ls)D'; \tag{2}$$

$$3^\circ \text{ en el líquido de densidad } d, \quad m = (V + xs)d. \tag{3}$$

Luego: $VD = (V + ls)D';$ de donde $V(D - D') = lsD'. \tag{4}$

Del mismo modo:

$$VD = (V + xs)d; \quad \text{de donde} \quad V(D - d) = xsd. \tag{5}$$

Dividiendo la ecuación [5], por la ecuación [4], se deduce:

$$\frac{xd}{lD'} = \frac{D - d}{D - D'}; \quad \text{de donde} \quad x = \frac{lD'(D - d)}{d(D - D')}.$$

Graduación por comparación. — Cuando ya se posee un densímetro graduado se pueden, graduar otros por comparación, como veremos al tratar del *alcoholímetro* (149). aprovechando el que las dos graduaciones son semejantes. En efecto, se ve que la relación $\frac{x}{l}$ sólo depende de las densidades D , D y d . Luego es lo mismo para todos los aparatos.

148. Areómetros de graduación arbitraria. — Areómetros Baumé. — Estos aparatos sirven : unos, para determinar la concentración de los líquidos más densos que el agua (*pesa-ácidos, pesa-sales, pesa-jarabes*); otros, para líquidos menos densos (*pesa-espíritus o pesa-licores*).

Se sabe que, por ejemplo, el *pesa-ácidos* de Baumé debe marcar 66 en el ácido sulfúrico concentrado ; 36, en el ácido nítrico del comercio ; 22, en el clorhídrico ordinario ; 3, en el agua de mar (a la temperatura de 21° C.), 35 en un jarabe bien preparado, etc. Del mismo modo, el *pesa-espíritus* debe marcar, normalmente, 36 en el éter corriente del comercio ; 65, en el éter rectificado, 22 a 25 en el amoníaco del comercio más o menos concentrado, etc.

Graduación. — 1° *Pesa-ácidos.* — He aquí el procedimiento que empleaba Baumé. Se regula el peso del aparato de modo que, en agua pura, a la temperatura de 12°,5 centígrados, se sumerja casi hasta el extremo superior de su varilla : en este punto A se marca 0° (fig. 155). Luego, se introduce el aparato en una solución de 85 partes de agua y 15 de sal común. Este líquido (cuya densidad es 1,116) es más denso que el agua pura, por lo cual el aparato no penetra en él sino hasta un punto B, que se señala con el número 15. Finalmente, se divide el espacio de A a B en 15 partes iguales y se continúan las divisiones hasta el extremo inferior de la varilla. Generalmente, estas divisiones están marcadas en una faja de papel que se introduce en el interior de la varilla.

2° *Pesa-licores.* — En estos aparatos, el 0 debe hallarse forzosamente en la parte más baja de la varilla (fig. 156). Se marca el 0 en el punto de alcance en una disolución de 90 partes de agua destilada y 10 de sal marina (densidad = 1,0847). El 10, se señala en el punto de alcance del agua destilada (a la temperatura de 12°,5 C.). Este último punto está necesariamente encima del anterior, en la varilla. Después, se divide el intervalo en 10 partes iguales, y se prolongan las divisiones hasta el extremo superior de la varilla.

3° *Otros procedimientos.* — Actualmente, se efectúan las graduaciones por métodos algo diferentes. Así, para los *pesa-ácidos* se marca el 0 en agua pura y el 66 en ácido sulfúrico al máximo de concentración : luego, se divide el intervalo en 66 partes iguales. De modo análogo se procede para los areómetros destinados a los líquidos menos densos que el agua, empleando un líquido cuyo grado se conoce previamente.

149. Alcoholímetro centesimal de Gay-Lussac. — El *alcoholímetro centesimal* es un areómetro inventado por Gay-Lussac para medir la *fuerza* de los líquidos espirituosos a 15°C., es decir, el número de centésimas de alcohol puro, en volumen, que contienen estos líquidos a dicha temperatura.

La forma del alcoholímetro es análoga a la del *pesa-espíritus* de Baumé (fig. 157); pero la graduación difiere, y es completamente empírica. La escala, sostenida por el vástago, está dividida en 100 partes, cada una de las cuales representa una centésima de alcohol en volumen. Por ejemplo, si a 15° C el alcoholímetro penetra en un aguardiente hasta la división 48, esto quiere decir que el licor contiene 48 centésimos de su volumen de alcohol puro y el resto de agua.

Graduación. — Se marca la escala del alcoholímetro introduciendo

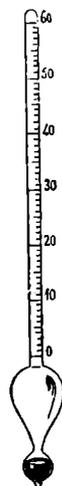


Fig. 156.

sucesivamente el instrumento en mezclas de alcohol y de agua hechas en proporciones conocidas, a la temperatura fija de 15°.



Fig. 157.

Al efecto se toma una probeta de pic, graduada en 100 partes iguales, y después de verter en ella alcohol absoluto hasta la división 95, se acaba llenándola hasta 100 con agua destilada. Para esto hay que añadir más de 5 cm³ de agua, porque cuando se mezclan agua y alcohol, el volumen de la mezcla es más pequeño que la suma de los volúmenes de los componentes. Así se obtiene una mezcla en que hay ciertamente 95, por 100 de alcohol absoluto, y si se introduce en ella el instrumento, hay razón para marcar 95 en el punto de nivel. Del mismo modo se determinan todos los grados, de 5 en 5, desde 95 hasta la división 5. Por fin se marca 100° en el alcohol absoluto y 0° en el agua pura; divídense en cinco partes iguales cada uno de los intervalos de 5 en 5, y el instrumento queda graduado.



Fig. 158.

Fig. 157. OBSERVACIÓN. — Hoy ya no se emplea este método de Gay-Lussac. El procedimiento en uso está fundado en el conocimiento de las densidades de diferentes mezclas de alcohol y de agua; es análogo al que hemos indicado para los densímetros.

Tabla de corrección. — Importa observar que habiendo sido graduado a 15° el alcoholímetro de Gay-Lussac, sólo son exactas sus indicaciones a esta temperatura. A otras más altas o más bajas, los líquidos alcohólicos se contraen y se hacen por consiguiente más ligeros o más densos, de modo que el instrumento penetra en ellos cada vez más o menos, no obstante ser la misma su riqueza alcohólica. Entre 0° y 30° C., el error cometido de este modo puede llegar hasta 30 por 100 de la fuerza del licor.

Este error puede enmendarse por medio de una tabla de corrección hecha por Gay-Lussac. Es una tabla de doble entrada, que contiene en una columna vertical las temperaturas de cero a 30° y en otra horizontal los grados del alcoholímetro de cero a 100. Por ejemplo; estando un aguardiente a la temperatura de 22°, y marcando en él 36 el alcoholímetro, la tabla indica que la riqueza real del licor es 33 : quiere decir que contiene los 33 centésimos de su volumen de alcohol.

He aquí, a título de ejemplo, un fragmento de la tabla de corrección empleada (véase p. 127) :

Serie de alcoholímetros. — Para conseguir mayor sensibilidad, se construyen alcoholímetros de varilla fina, que sólo ofrecen un número reducido de grados (fig. 158); pero graduados de cinco en cinco centésimas de grado. Por lo tanto, se necesita una serie de estos aparatos.

Graduación por comparación. — Es inútil repetir con todos los areómetros centesimales de la misma categoría, por ejemplo con todos los alcoholímetros, la serie de operaciones que exige la graduación de Gay-Lussac : basta con marcar empíricamente, por el método indicado, un tipo de cada especie; después se gradúan los demás por comparación.

Este método de graduación se funda en el hecho de que *las escalas de dos alcoholímetros centesimales son semejantes*. Para construir un alcoholímetro, se determinan directamente dos grados cualesquiera, 0 y 100 por ejemplo; después se ponen al lado y paralelamente la escala AA' del alcoholímetro ya graduado y la escala AA' del alcoholímetro por graduar. Se unen por dos rectas las dos divisiones 0 y las dos divisiones 100. Estas rectas se encuentran en un punto O (fig. 159); entonces no hay más que unir el punto O a los diversos grados del alcoholímetro graduado; las intersecciones de estas rectas con la escala por construir representarán sus divisiones.

		GRADOS DEL ALCOHOLÍMETRO								
		8	9	10	11	12	13	14	15	16
GRADOS DEL TERMÓMETRO	10	8,5	9,5	10,6	11,7	12,7	13,8	14,9	16	17
	11	8,1	9,4	10,5	11,6	12,6	13,6	14,7	15,8	16,8
	12	8,3	9,3	10,4	11,5	12,5	13,5	11,6	15,6	16,6
	13	8,2	9,2	10,3	11,4	12,4	13,4	11,4	15,4	16,4
	14	8,1	9,1	10,2	11,2	12,2	13,2	11,2	15,2	16,2
	15	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	16	7,9	8,9	9,9	10,9	11,9	12,9	13,9	14,9	15,9
	17	7,8	8,8	9,8	10,8	11,7	12,7	13,7	14,7	15,7
	18	7,7	8,7	9,7	10,7	11,6	12,5	13,5	14,5	15,4
	19	7,5	8,5	9,5	10,5	11,4	12,4	13,3	14,3	15,2
	20	7,3	8,3	9,3	10,3	11,2	12,2	13,1	14	14,9

Ensayo alcoholimétrico de un vino. — No se puede determinar el grado alcoholimétrico de un vino sumergiendo directamente en él el alcoholímetro, porque además del agua y el alcohol, contiene también otras sustancias. Primero, se mide un volumen determinado, por ejemplo, 50 cm³, por medio de una probeta graduada. Luego, se destila (306) hasta que el líquido recogido en la probeta tenga un volumen igual a la mitad del volumen primitivo; entonces, hay la seguridad de que se ha destilado todo el alcohol. Añádese agua hasta restablecer el volumen primitivo; con lo cual se produce una mezcla de agua y de alcohol que, en el mismo volumen total, contiene igual cantidad de alcohol que el vino que se ensaya. En esta mezcla, es donde debe colocarse el alcoholímetro.

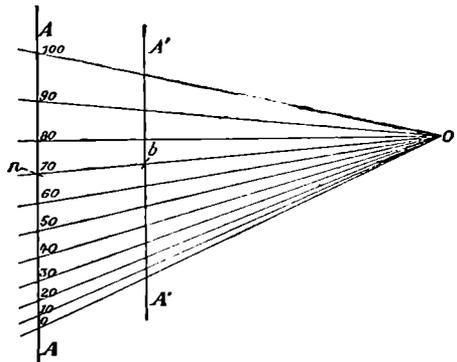


Fig. 159.

OBSERVACIÓN. — *Extensión de la graduación centesimal a los pesa-sales.* — Los pesa-sales pueden graduarse también con arreglo al principio del alcoholímetro centesimal. Estos aparatos sirven para determinar instantáneamente la cantidad de tal o cual sal contenida en una solución dada. El cero de su graduación corresponde siempre al agua pura. Se marca sucesivamente 5, 10, 15, 20... en los diferentes puntos de alcance en soluciones que contengan 5, 10, 15, 20... por 100 de sal; luego se divide cada espacio en 5 partes iguales.

Este modo de graduación presenta el inconveniente de que se necesita un pesa-sales particular para cada especie de sal.

LIBRO III

NEUMÁTICA

CAPÍTULO I

PRESIÓN ATMOSFÉRICA. — BARÓMETROS. MAMÓNETROS

150. **Peso de los gases.** — *Los gases son pesados* como los líquidos y como todos los demás cuerpos. Esta proposición, que tan evidente parece hoy, fué apenas sospechada por los antiguos y no se demostró experimentalmente hasta Galileo. Éste hizo constar que *el aire es pesado*, probando que un recipiente donde se comprime aire aumenta de peso.

También se demuestra el mismo fenómeno mediante un experimento inverso, que se debe a Otto de Guericke. Cuélgase de uno de los platillos de una balanza muy sensible un matraz de vidrio, cuyo cuello tiene una buena llave. Se empieza por hacer el vacío en el matraz y después se le pesa vacío, teniendo cuidado de poner previamente algunos gramos en el platillo del mismo lado. Entonces se abre la llave; el aire penetra en el matraz con un silbido característico y el fiel se inclina hacia esa parte. Restablécese el equilibrio quitando cierto número de gramos, cuya masa representa evidentemente la del aire que ha entrado de nuevo en el matraz. Este experimento da aproximadamente 1 gr. 3 para la masa de un litro de aire (tomado en las condiciones ordinarias).

151. **Presión en los gases.** — **Presión atmosférica.** — Al igual de los líquidos, los gases en equilibrio ejercen, a causa de su peso, presiones sobre las paredes de los vasos que los contienen y sobre los cuerpos sumergidos en ellos. Así, el peso de la atmósfera debe ejercer presión sobre el suelo y sobre los cuerpos sumergidos en el aire. Esta presión se comprueba por numerosos experimentos clásicos.

Rompe-vejigas. — Se toma, por ejemplo, un tarro de vidrio (fig. 160 y 161) herméticamente cerrado en su parte superior por una membrana de pergamino o vejiga. Por el otro extremo, abierto, se pone en co-

municación el tarro con una bomba aspirante. En cuanto comienza a practicarse el vacío la membrana se deprime y luego se rompe con una detonación debida a la entrada repentina del aire. El resultado del vacío ha sido suprimir o, cuando menos, disminuir la presión en la cara inferior y dejar que la presión obre sólo sobre la cara superior; de donde ha procedido la ruptura de la membrana.

El experimento se cumple cualquiera que sea la inclinación del tarro (fig. 161) : lo

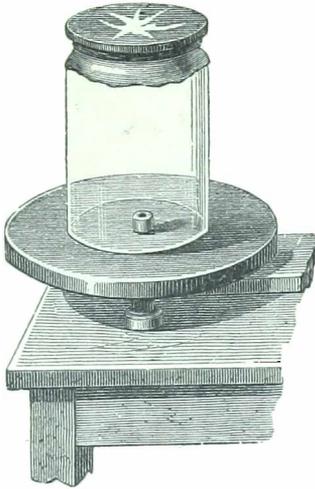


Fig. 160.

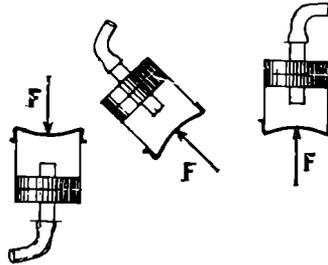


Fig. 161.

cual demuestra que la presión atmosférica se ejerce en todos sentidos.

152. **Diferencia de las presiones en dos puntos de una masa gaseosa.** — El principio fundamental de la hidrostática se aplica igualmente a los gases : *La diferencia de presiones en dos puntos de una masa de gas es,*

pues, igual al peso de una columna de este gas, que tenga por base 1 cm^2 y por altura, la diferencia de nivel de ambos puntos.

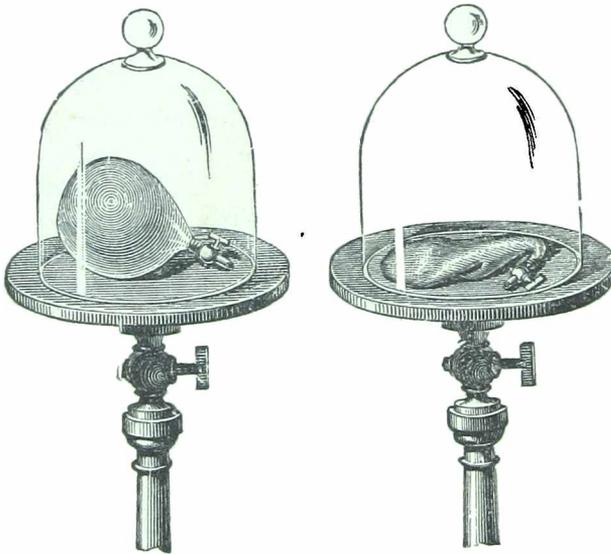


Fig. 162.

Pero, como los gases son muy poco densos, se deduce que si la diferencia de los niveles es pequeña, lo mismo ocurrirá con la diferencia de presiones. Por lo tanto, se puede suponer que la presión en un recipiente de gas es la misma en todos sus puntos; es decir, que cada centímetro cua-

drado de la pared, tomado en cualquier sitio de esta pared, se halla sometido a la misma fuerza, la cual mide la *presión del gas en el recipiente*. Mas, si se consideran puntos de nivel muy diferente, como, por

ejemplo, la falda y la cúspide de una montaña, el experimento nos dará una diferencia notable de presiones en estos dos puntos (155).

153. **Expansibilidad de los gases. — Fuerza elástica.** — Mientras que los líquidos ejercen presiones, en virtud únicamente de su peso, los gases las ejercen, además, por su *expansibilidad*. Si colocamos una vejiga cerrada y que contenga un poco de aire, en un recipiente en donde pueda enrarecerse el aire (fig. 162), la veremos hincharse más y más, a medida que se extrae el aire del recipiente. Esto demuestra que el gas ejerce fuerzas sobre las paredes de la vejiga; puesto que tiende a aumentar de volumen. (Por esta razón, la presión de un gas en un recipiente se llama también su *fuerza elástica*.)

Si se deja entrar el aire en el recipiente, la vejiga toma otra vez su volumen primitivo; entonces la acción de la presión atmosférica comprime el aire interior.

Aun en un lugar lejano de la tierra, en que la gravedad fuese nula, un gas no dejaría de ejercer presión sobre su envoltura; mientras que, en tales condiciones, un líquido no ejercería presión alguna.

La expansibilidad produce otro efecto, inverso del de la gravedad.

Tiende a alejar los gases de la tierra. Si la atmosfera se mantiene a la superficie del globo, es porque la gravedad domina a la expansibilidad.

154. **Medida de la presión atmosférica. — Experimento de Torricelli.** — El experimento siguiente, efectuado por vez primera por Torricelli, en 1643, permite medir la presión atmosférica.

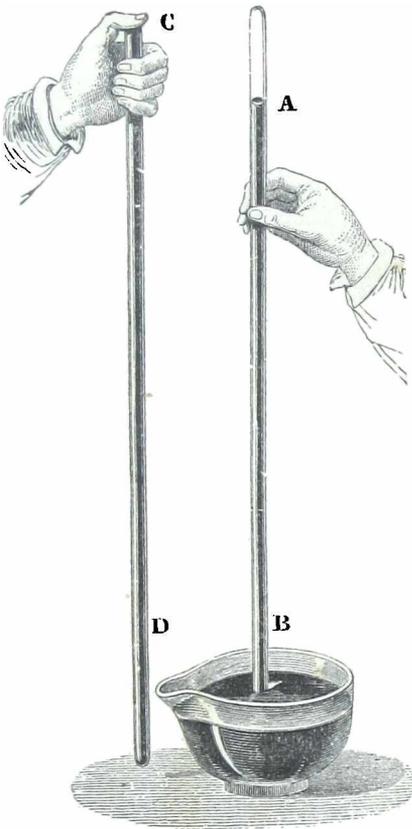


Fig. 163.

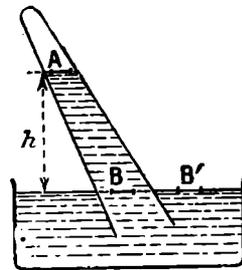


Fig. 164.

Se toma un tubo de vidrio, de 80 centímetros de longitud, por lo menos, cerrado en uno de sus extremos. Se lo coloca verticalmente (fig. 163) y se llena completamente de mercurio; luego, cerrando con el dedo pulgar la abertura C, se le da vuelta y se sumerge el extremo abierto en una cubeta de mercurio. Se retira, entonces, el dedo, y se ve

de mercurio como el tubo de un barómetro de cubeta : la altura barométrica se mide por *la distancia vertical de los niveles en las dos ramas.*

158. **Construcción del barómetro.** — La teoría del barómetro supone esencialmente que en la cámara barométrica existe el vacío más perfecto. Si se llenase el tubo sin precaución, siempre quedaría aire adherido al vidrio, así como también humedad que introduciría vapor de agua en la cámara barométrica.

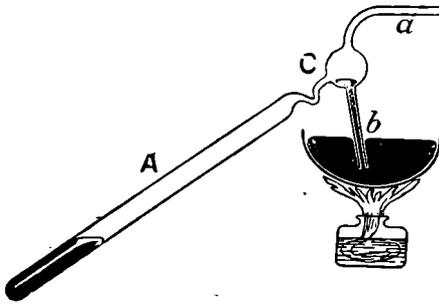


Fig. 167.

En los tubos de diámetro pequeño, se obvia este inconveniente haciendo hervir mercurio en el tubo, ligeramente inclinado y calentado en toda su longitud por medio de un hornillo de gas. En los tubos anchos, se suelda una ampolla *C* (fig. 167), al extremo; en esta ampolla, van soldados dos tubos, *b* que termina por una punta cerrada, en un principio, *a*, por el cual se introduce la ampolla y el tubo barométrico que comunica con una bomba de efectuar el vacío. Se obtiene el vacío, calentando al mismo tiempo el tubo para expulsar a la vez el aire y la humedad.

Luego, se rompe la punta *b*, introducida en mercurio caliente. Este sube poco a poco y se esparce por el tubo barométrico. La punta debe ser lo suficientemente fina para que el tubo tarde dos horas en llenarse. Después, se corta el tubo en *C* y se le da vuelta en la cubeta.

Se conoce que el barómetro está bien construido, inclinando el tubo (fig. 165). Si en la cámara barométrica no queda ningún residuo de gas, el mercurio, dando una inclinación suficiente, llena totalmente el tubo y choca en su vértice produciendo un ruido seco. Si queda algo de aire, en el vértice del tubo, y cualquiera que sea su inclinación, se producirá una burbuja de este aire.

159. **Diversas formas de barómetros.** — **Medida de la altura barométrica.** — A los barómetros se les da formas variadas. Para los instalados en lugares fijos (que es el caso más general) se toman tubos de unos 3 o 4 centímetros de diámetro); porque, en virtud de un fenómeno *capilar* (220) la altura del mercurio en un tubo estrecho es menor que si éste fuese ancho. Por otra parte, basta que el tubo sea ancho en el punto en que se halla el nivel del mercurio. La figura 168 representa algunas de las formas que se da a los barómetros de precisión. El nivel del mercurio, en el tubo y en la cubeta, se hallan en la misma vertical. Si se quiere determinar la altura barométrica por medio de una regla graduada, hay que aplicarla contra los niveles del mercurio (fig. 169). En este caso, es necesario colocar todo de tal modo que la escala graduada esté bien vertical, porque, en cualquiera otra posición, como la diferencia de nivel continúa siendo la misma, se mediría una longitud demasiado grande.

Para operar con mayor exactitud se emplea, para medir la diferencia de nivel, un catetómetro o, mejor aún, un comparador.

Precauciones y correcciones necesarias. — Para determinar con precisión los extremos mercuriales o *meniscos*, conviene que éstos se hayan producido después de una subida del mercurio, para evitar los meniscos huecos que se producen, con frecuencia, cuando el barómetro baja.

Esto se consigue ora sumergiendo un émbolo de vidrio en un recipiente lateral colocado al nivel de la rama abierta (barómetro de émbolo de inmersión de M. Amagat, (fig. 168, I), ora bajando el tubo barométrico a una de las ramas de una cubeta en forma

de U (*barómetro de tubo móvil*, ng. 168, II), o ya elevando una probeta que comunique con la rama menor del barómetro y que contenga mercurio (*barómetro de reserva auxiliar*, (fig. 168, III). Los órganos móviles son conducidos por correderas.

Se toma por extremo de la columna mercurial el centro de la distancia que separa una punta fina de vidrio negro, encorvada hacia el menisco (fig. 168, III) y mirando a la

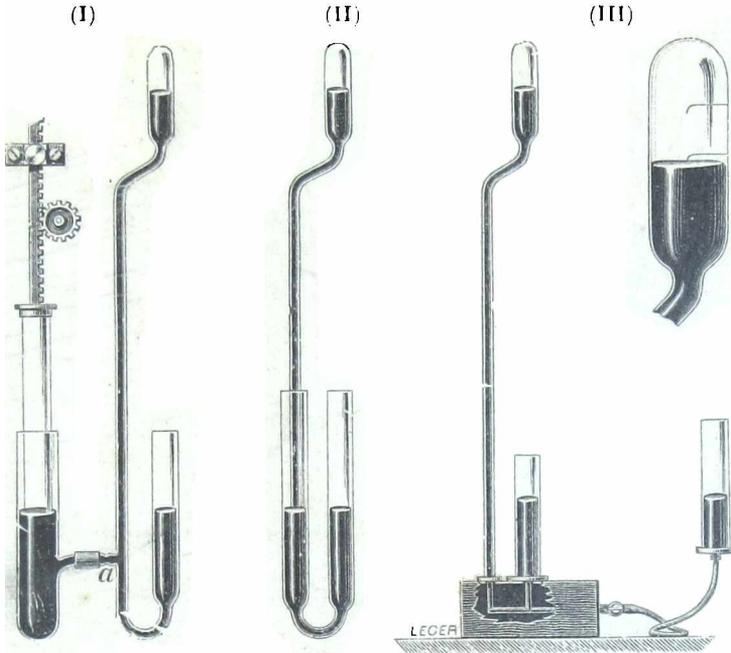


Fig. 168.

parte central de la imagen de la punta dada por esta región del menisco, que es plana (Pariett). Se puede reemplazar la punta por la imagen de un hilo (Marck).

Corrección de temperatura. — Como la densidad del mercurio varía con la temperatura, es necesario conocer ésta. Se mide por medio de termómetros próximos a la columna barométrica. Más adelante (251) indicaremos el modo de efectuar la corrección necesaria.

160. Barómetros transportables. — Para construir barómetros transportables se emplean varios procedimientos.

Así, en el antiguo barómetro de Fortin (fig. 170) la cubeta posee un fondo móvil formado con gamuza que se puede subir o bajar por medio de un tornillo C colocado debajo. Por arriba, la cubeta se halla cerrada por un trozo de gamuza detenida por el mercurio; pero que permite que la presión atmosférica se ejerza en la cubeta. Cuando se transporta el aparato, se maniobra el tornillo, que levanta el fondo móvil y, con él, el mercurio, hasta que éste llene por completo el tubo y la cubeta; entonces, el mercurio y su envoltura no forman más que un solo bloque que se halla perfectamente al abrigo de los choques y del acceso del aire.

Para servirse de él, se baja el fondo móvil, por medio del tornillo C, hasta que el mercurio llegue a una punta *a* fija.

Se mide la altura barométrica por medio de una escala graduada, colocada en una vaina metálica que rodea al tubo y cuyo cero está en *a*.

OBSERVACIÓN. — *Corrección capilar.* — Como el tubo no es ancho,

hay que hacer una *corrección capilar*, cuyo principio indicaremos más adelante (220).

161. **Variaciones de la presión atmosférica en un mismo lugar.** —

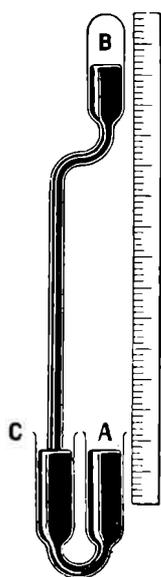


Fig. 169.

Barómetros metálicos o aneroides. — En un mismo lugar, la altura barométrica varía constantemente. En París, oscila entre 73 y 78 centímetros. Estas variaciones están en relación con el estado meteorológico de la atmósfera (1038).

En las aplicaciones meteorológicas se emplean especialmente barómetros metálicos; son menos exactos que los de mercurio; pero, también menos frágiles y más transportables.

Barómetro de Vidie. — Este barómetro indica las variaciones de la presión atmosférica mediante las deformaciones más o menos grandes que ésta hace experimentar a una caja metálica, de paredes muy elásticas, vacía de aire y perfectamente cerrada. La presión atmosférica tiende a comprimir más o menos esta caja, pero no completamente por tropezar con la resistencia de un resorte. Un mecanismo transmite los débiles movimientos de la cara

superior de la caja * a una aguja móvil sobre un cuadrante.

La flexión hace mover verticalmente un tope metálico pequeño y grueso M (fig. 171), fijo en el centro de la base acanalada. Este movimiento se transmite a la aguja por medio de un resorte R, de vástagos articulados *l* y *m*, del eje *r*, del vástago articulado *t* y de la cadena S, que va a arrollarse en la polea que sostiene la aguja, manteniéndose tensa mediante un pequeño resorte antagonico. La aguja se mueve en un cuadrante, tal como el que representa la fig. 172.

El instrumento se gradúa por comparación con un barómetro de mercurio, poniéndole, al lado de este barómetro, en un recipiente, en el cual se hace variar la presión. Esta graduación, que es poco exacta, aun desde el principio, se vuelve cada vez menos exacta por causa de una variación lenta de la elasticidad del muelle metálico. Por eso es preciso verificarla de tiempo en tiempo.

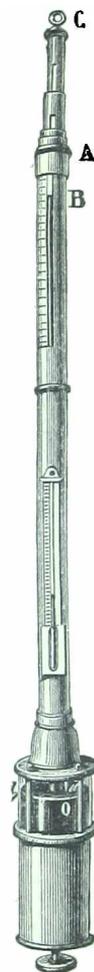


Fig. 170.

Barómetro de Bourdon. — Está formado (fig. 172) por un tubo metálico aplanado (cuya sección se ve en S), donde se hace el vacío y que se fija por su punto medio. Cuando aumenta la presión atmosférica, como no está equilibrada interiormente, el tubo se aplana más, se ensancha su sección y su longitud disminuye : de ahí resulta que la curvatura se acentúa y que las dos extremidades se acercan una a otra. Si la presión atmosférica disminuye se opera el movimiento contrario. Estos movimientos se transmiten a la aguja por medio de dos vástagos articulados a una palanca móvil en torno de su punto fijo. Los dos brazos de la palanca se enlazan con los vástagos, y su centro está en rela-

* Como esta cara está acanalada, contribuye a aumentar más la flexión correspondiente a una variación dada de presión.

ción con un sector dentado, a que transmite los movimientos del tubo metálico; el sector engrana con un piñón que sirve de sostén a la aguja y la hace moverse sobre una muestra

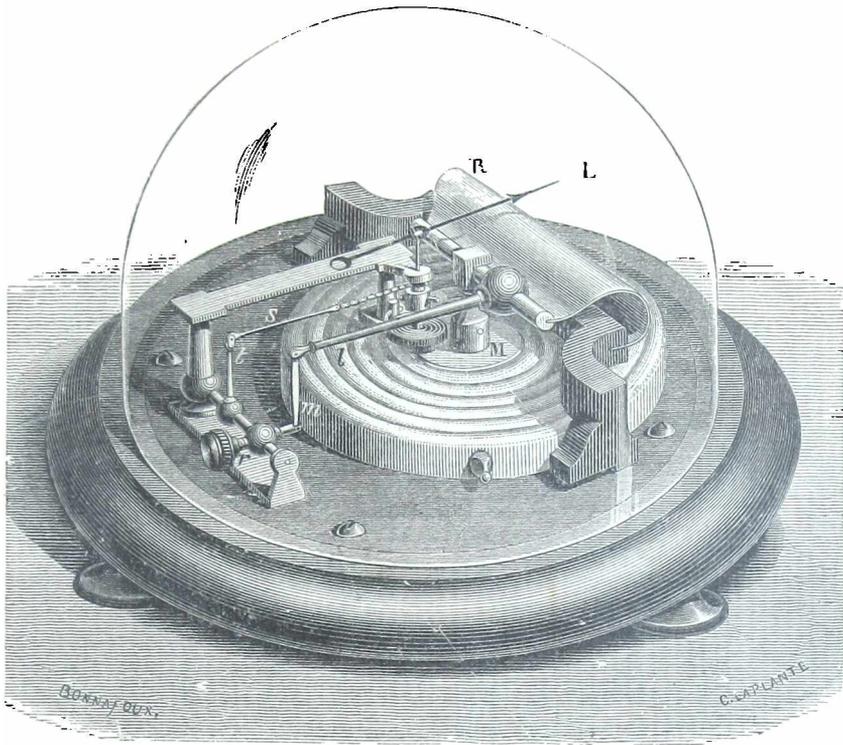


Fig. 171.

graduada donde se marcan las indicaciones *variable*, *buen tiempo*, *buen tiempo fijo*, etc.

OBSERVACIÓN. — Para apreciar la precisión de un instrumento de éste género, hay que ensayarlo en comparación con uno de mercurio en un recipiente donde se hace variar gradualmente la presión dentro de los límites a que se destina. Este ensayo debe repetirse de tiempo en tiempo, a título de comprobación.

162. **Barómetro registrador de MM. Richard.** — Este instrumento (fig. 173) se compone de una serie de cajas elásticas análogas a las del barómetro Vidio apiladas unas sobre otras, de modo que sus flexiones se comunican y transmiten por palancas que amplían más el movimiento, a una aguja *a* cuyo extremo, terminado en punta de pluma y provisto de tinta, se mueve de un punto a otro de las generatrices de un cilindro giratorio. Este cilindro da una vuelta completa en una semana; su superficie está cubierta de un papel pautado en el cual están escritos sobre un paralelo, enfrente de las generatrices equidistantes, los días de la semana y las horas, y sobre una generatriz, en frente de cada paralelo, las diversas presiones. De este modo el instrumento traza automática-



Fig. 172.

mente una curva en la que se ve, no sólo la presión del momento en que se observa el instrumento, sino las presiones anteriores. Estas indicaciones continuas que indican la marcha general de las variaciones de la presión atmosférica, son muy útiles para la

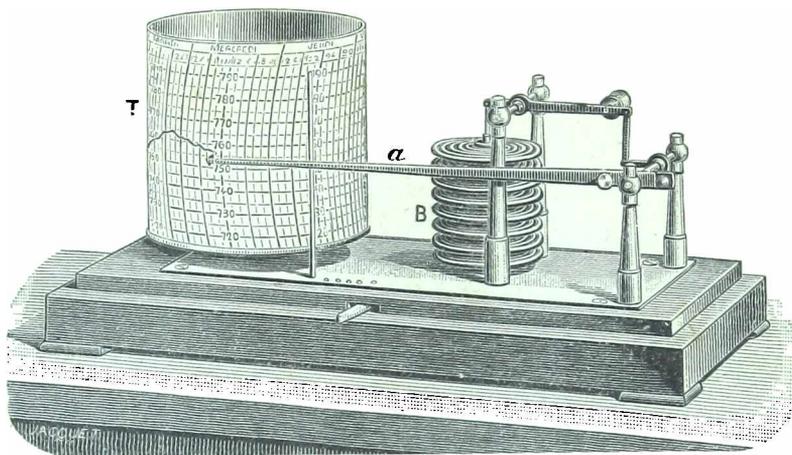


Fig. 173.

previsión del tiempo. Por eso, á pesar de ser poco preciso, este instrumento presta buenos servicios en meteorología sobre todo.

163. Nivelación barométrica. — Altura de la atmósfera. — La presión atmosférica disminuye a medida que se sube en la atmósfera. — Como la disminución de presión se revela por el descenso de la columna barométrica, resulta de ahí que existe relación entre la altura de un lugar y la altura barométrica que en el mismo se observa. Concíbese pues que de la observación del barómetro se puede deducir la distancia vertical de dos lugares situados en la misma latitud, pero a diferentes alturas. Esta operación geodésica se llama en ocasiones *nivelación barométrica*.

1º Cálculo aproximado. — Si la densidad del aire fuera la misma a todas las alturas, la operación se reduciría a un cálculo sencillísimo. En efecto, siendo la densidad del mercurio unas 10.466 veces mayor que la del aire, una columna barométrica de 1 milímetro haría contrapeso a una de aire de análoga sección y 10.466 veces más alta, es decir, igual a 10,466 m. Por consiguiente, si la diferencia de las alturas barométricas observadas en dos estaciones fuera de n milímetros, se deduciría de ahí que la diferencia de las alturas es n veces 10,466 m. Pero como la densidad del aire disminuye a medida que se sube en la atmósfera, este cálculo no puede aplicarse sino a alturas muy pequeñas.

2º Fórmula de Laplace o fórmula barométrica. — Teniendo en cuenta esta variación de densidad llegó Laplace a descubrir una relación numérica bastante compleja entre las alturas barométricas H' y H , observadas en dos estaciones de latitud λ , y su diferencia de altitud z . Esta relación, que se llama fórmula barométrica, es la siguiente :

$$z = 18\,405^m (1 + 0,002552 \cos 2\lambda) \left[1 + 2 \frac{t + t'}{1\,000} \right] \log \frac{H'}{H};$$

H' y H son alturas barométricas *corregidas y reducidas*, en la estación más elevada y en la más baja, t' y t las temperaturas, en esas estaciones.

3^o *Fórmula de Babinet.* — Para las alturas inferiores á 1 000 metros, Babinet ha dado la fórmula simplificada.

$$z = 16\,000^m \left(\frac{\Pi - H'}{\Pi + H'} \right) \left[1 + \frac{2(t + t')}{1\,000} \right].$$

Aplicación de las fórmulas. — La aplicación más frecuente de estas fórmulas consiste en medir la altura de una montaña. Conviene elegir para ello un tiempo tranquilo, para obtener en cuanto es posible el estado de equilibrio atmosférico supuesto por la fórmula. Si la altura que se mide no es muy grande, cabe operar solo; pero en el caso de ser considerable y exigir tiempo de ascensión algo largo, durante el cual puede variar la presión atmosférica, entonces debe haber dos personas, provistas de barómetros comparables. Uno de los observadores se queda al pie de la montaña, mientras el otro se transporta a la cima; después, a la hora convenida toman nota simultánea de la altura del barómetro y de la temperatura.

Barómetros altimétricos. — Estos son metálicos, poco exactos, que marcan la altura a que se sube. El cuadrante del barómetro altimétrico Goulier tiene dos graduaciones; la que está fija indica la presión, la otra, que puede girar, da la altitud sobre el punto de partida. Antes de dejar el sitio más bajo, se hace coincidir el cero de la división altimétrica con la posición de la aguja del barómetro. Cuando se empieza a subir, la aguja se mueve e indica directamente el número de metros que se han subido.

Altura de la atmósfera. — La valuación aproximada de esta altura puede efectuarse por medio de las estrellas fugaces, que se vuelven incandescentes cuando atraviesan las altas regiones de la atmósfera y cuya altura puede determinarse. De este modo, se ha hallado como altura máxima 120 km.

M. Sée de Washington ha indicado otro método, que consiste en notar el intervalo de tiempo que separa la puesta del sol de la desaparición del azul del cielo. Sabemos que este color azul es producido por la difusión de la luz por partículas extremadamente pequeñas que flotan en el aire (676). M. Sée ha hallado que la altura máxima a que se encuentran estas partículas es de 211 km. Estos resultados, muy diferentes, no están en contradicción, porque puede suceder que los meteoritos no se iluminen en las capas más elevadas de la atmósfera donde es extremada la rarefacción.

MEDIDA DE LA PRESIÓN DE UN GAS. — MANÓMETROS

164. Empleo del barómetro. — Manómetro de aire libre. — El barómetro puede servir también para medir la presión de un gas en un recipiente. Basta poner éste en comunicación con la rama abierta del barómetro de sifón (fig. 174) y medir la diferencia de nivel que se establece. Pero el barómetro es un aparato poco transportable y difícil de construir; por lo cual se emplean con preferencia otros aparatos llamados *manómetros*.

Manómetro de aire libre. — Generalmente se le da la forma de un tubo encorvado, en el cual se introduce mercurio (fig. 175 y 176). Una de sus ramas se pone en comunicación con el recipiente en que se quiere medir la presión; la otra queda abierta al aire.

1^o Si la presión en el recipiente iguala a la presión atmosférica, los niveles del mercurio en las dos ramas se hallarán en el mismo plano horizontal. Pero si la presión en R es mayor que la atmosférica, el mercurio adquirirá nivel más elevado en la rama abierta al aire. La presión que se quiere medir p , se ejerce en A sobre el mercurio; la presión tiene igual valor en A', en el mismo plano horizontal que A. Es, pues, igual a la presión atmosférica que se ejerce en B aumentada en la presión que ejerce la columna de mercurio que tiene por altura la diferencia de nivel h del mercurio en las dos columnas. Por lo tanto,

si H centímetros es la altura barométrica del momento, medida con un barómetro próximo, la presión del gas es igual al peso de una columna de mercurio que tenga 1 cm^2 por base y $H + h$ cm. de altura. Si llamamos d a la densidad del mercurio (a la temperatura a que se verifica el experimento), la presión p es igual al peso de $(H + h) d$ gramos por centímetro cuadrado; de donde $p = (H + h) dg$ dinas por centímetro cuadrado.

2º Si la presión en R es menor que la presión atmosférica, el mercurio se establece a un nivel más elevado por la parte de R (fig. 176). La presión en el recipiente, que se ejerce en A , aumentada con la

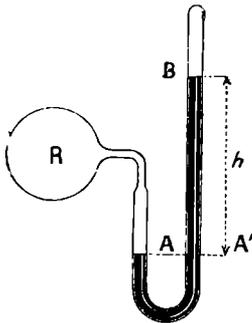


Fig. 174.

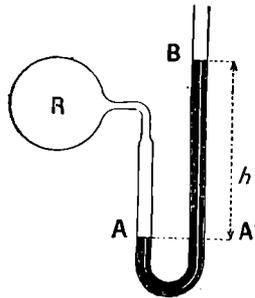


Fig. 175.

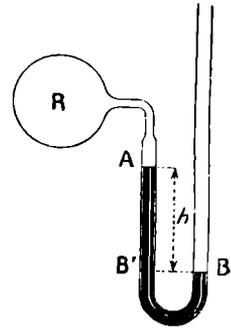


Fig. 176.

presión de la columna de mercurio de altura h , iguala a la presión atmosférica que se ejerce en BB' . Luego la presión del gas es igual al peso de una columna de mercurio de $H - h$ centímetros de altura, es decir $(H - h) d$ gramos por cm^2 o $(H - h) dg$ dinas por cm^2 .

Manómetros de líquidos menos densos que el mercurio. — Para la medición de presiones pequeñas conviene sustituir el mercurio, en los manómetros, por un líquido menos denso. Tomando el agua, que es 13,6 veces menos densa que el mercurio, la misma diferencia de presión producirá una diferencia de nivel 13,6 veces más grande.

En general, si la altura barométrica es H cm., medida con un barómetro de mercurio (densidad d), y si h cm. es la diferencia de nivel del manómetro que contenga un líquido de densidad d' , la presión del gas es igual al peso de $Hd \pm hd'$ gramos por cm^2 o bien $(Hd \pm hd')$ g dinas por cm^2 . El signo $+$ corresponde al caso en que el nivel líquido esté más alto por el lado de la atmósfera y el signo $-$, al caso contrario.

165. **Manómetro de Regnault.** — Entre los manómetros de aire libre, citaremos un modelo frecuentemente empleado por Regnault. Se compone de dos largos tubos de vidrio, A y B (fig. 177), encajados en una pieza de fundición doblada dos veces en ángulo recto; esta pieza se halla perforada por un canal interior y provista de un grifo R de tres vías que permite, bien establecer la comunicación entre las ramas (fig. 177, I), bien suprimirla, o ya hacer derramar el mercurio de una de las ramas o de las dos.

La diferencia de nivel se determina por medio de escalas en milímetros, trazadas en los mismos tubos o bien leyendo las divisiones del catetómetro.

166. **Manómetro barométrico o barómetro diferencial de Regnault.** — Es un aparato destinado a medir presiones pequeñas. Consta de un tubo A (fig. 178) que, por su parte superior, comunica con el recipiente en que se quiere medir la presión y que descansa sobre una cubeta de mercurio. Junto a él, hay un barómetro B . Si la presión fuese nula

en el recipiente, los niveles en A y en B serían iguales; pero como la presión en A no es nula, el mercurio se halla más bajo en A que en B. La presión, en el punto A' del barómetro que está al mismo nivel que A, tiene igual valor que en el gas. Y, como la presión es nula en la cámara barométrica C, se deduce que la presión del gas es simplemente igual al peso de la columna de mercurio que tiene por base 1 cm^2 y por altura la diferencia h de niveles de A y de B.

Modelo de A. Leduc. — Regnault adoptó para las tensiones pequeñas un manómetro que es una modificación de su barómetro normal. He aquí el modelo de este instrumento, usado por A. Leduc.

Al lado del tubo barométrico propiamente dicho B, se encuentra fijo un segundo tubo M de igual diámetro y terminado también en una punta fina que penetra en la misma cubeta (fig. 179). Este tubo manométrico se encuentra en comunicación por su parte superior con un gollete de llave que lo pone en relación con el recipiente donde está contenido el gas de escasa ton-

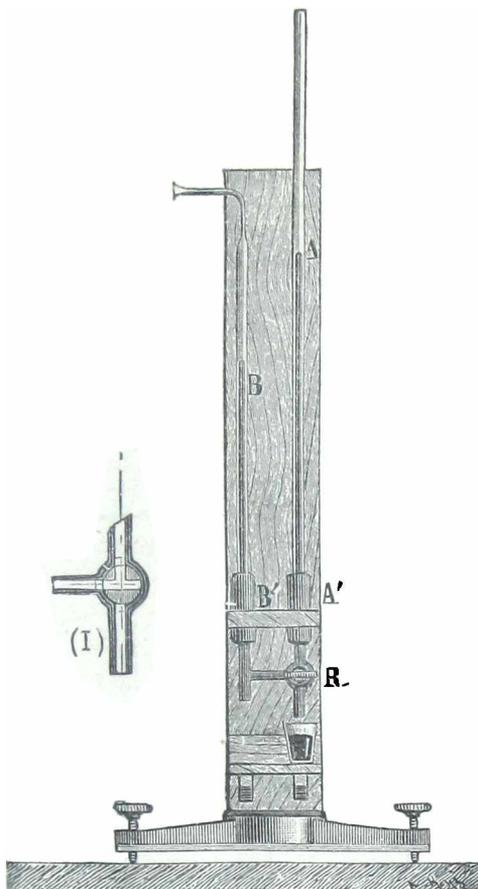


Fig. 177.

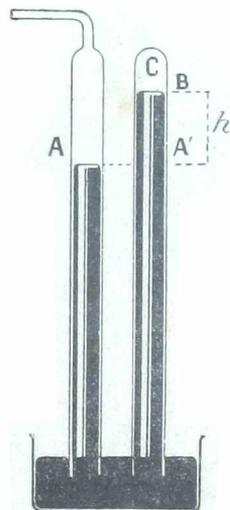


Fig. 178.

sión. Mientras mayor es la rarefacción en éste, más sube el mercurio en el tubo M, y la diferencia de nivel en los tubos B y M es lo que da a conocer la tensión que se mide con el catetómetro. La lectura se facilita gracias al empleo de correderas como C, provistas de miras especiales (banda negra entre dos bandas blancas), que se llevan detrás del nivel mercurial, y por una lámpara de incandescencia que ilumina la mira.

El nivel en la cubeta se ve fácilmente en un tubo ancho a manera de sifón, que hace las veces de vaso comunicante.

167. **Gran manómetro de aire libre de Cailletet.** — M. Cailletet ha instalado en la torre Eiffel un gran manómetro de aire libre que sirve para medir directamente hasta 100 atmósferas.

Se compone de un tubo de acero de unos 4 mm. 5 de diámetro que, partiendo del pilar oeste de la torre, sube hasta la 1ª plataforma siguiendo el plano inclinado de uno de los railes del ascensor. Entre la 1ª y la 2ª plataforma el tubo está apoyado contra la escalera helicoidal, y siguiendo la escalera en hélice sube de la 2ª plataforma hasta la cúspide.

De 3 en 3 metros están colocados unos tubos de vidrio de varios metros de largo, los cuales están en comunicación con el tubo de acero por medio de llaves cónicas.

Se hace subir el mercurio al manómetro por compresión de agua. El recipiente de mercurio y la bomba están instalados en un laboratorio del pilar oeste, en el cual se ha

colocado un manómetro metálico, graduado en atmósferas e indicando los números do orden de los tubos sucesivos, el cual señala a cada instante a qué tubo de vidrio lateral ha llegado el nivel de mercurio. Entonces no hay más que abrir la llave correspondiente que pone en comunicación el tubo de acero con el tubo de vidrio para poder ver con el antejo, en una regla de madera barnizada, la altura barométrica.

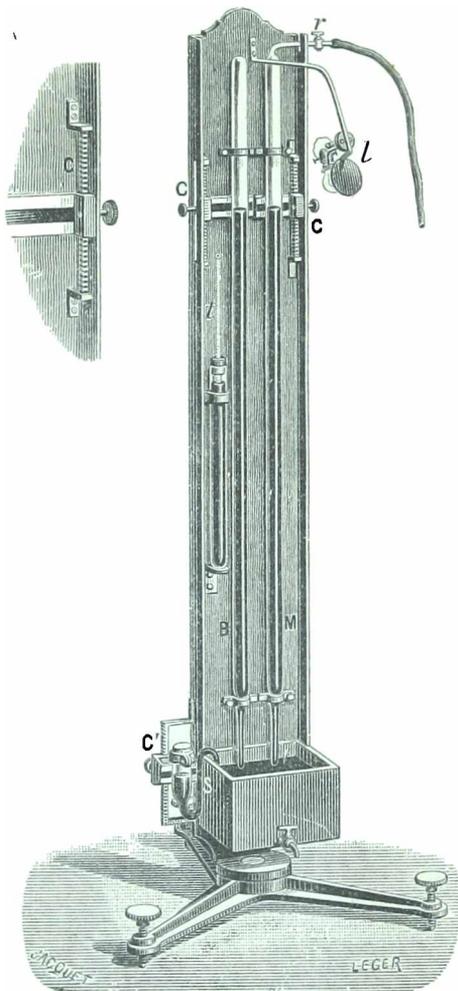


Fig. 179.

168. Manómetro llamado de Desgoffes. — Este instrumento, imaginado por Galli-Gajalat, es una aplicación del principio de Pascal, lo mismo que la prensa hidráulica, pero de cierto modo en sentido inverso.

Principio. — Sea P el valor, por centímetro cuadrado, de la presión que se trata de medir. En vez de hacer actuar directamente esta presión sobre el nivel mercurial en la cubeta, se la aplica en la cara superior a de un émbolo macizo, cuya cara inferior A descansa sobre la superficie del mercurio (fig. 180). Pues bien, mientras la sección s de la cabeza del émbolo es muy pequeña, la sección S de su base es muy ancha; de ahí resulta que la presión transmitida al mercurio, por unidad de superficie, no será ya sino una fracción de P , igual a $P \frac{s}{S}$. En consecuencia, si la columna mercurial necesaria para equilibrar a P ha sido H , la que hará contrapeso a la presión $P \frac{s}{S}$ será $h = H \frac{s}{S}$.

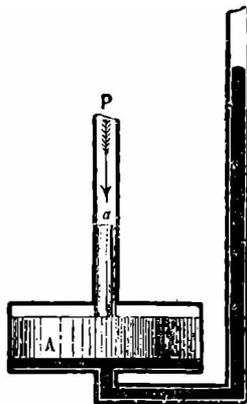


Fig. 180.

Suponiendo que $S = 100 s$, será posible equilibrar y medir una presión de 500 atmósferas con una columna de mercurio igual únicamente a cinco veces $0,76^m$, o sean 3,80 metros.

Pormenores de construcción. — La cabeza del émbolo es un cilindro de acero a que se mueve dentro de otro de bronce, del cual sale atravesando un cuero embutido; la base del émbolo está formada por un ancho disco metálico A , que cierra completamente la rama menor del manómetro. El émbolo y el mercurio están separados por un disco de caucho, que descansa a su vez, no directamente sobre el azogue, sino en ligerísima capa de agua.

El diámetro de la rama menor es tan grande respecto del de la mayor que cuando el mercurio sube hasta 4,20 m. en ésta, sólo baja un quinto de milímetro en aquella (experiencias de Cailletet).

Manómetro de M. Amagat. — M. Amagat ha perfeccionado el manómetro Desgoffes, que presenta varias causas do graves errores: el diámetro del émbolo grande no está bien definido; la membrana al moverse es objeto de un trabajo que convendría tener en

cuenta; por fin, el émbolo menor — que teóricamente debería estar completamente libre — se mueve con irregularidad y sacudimiento por estar muy apretado en su caja de cuero.

Cuando este aparato está bien construido funciona con toda regularidad hasta presiones muy altas: en los experimentos de Amagat llegó a más de 3 000 atmósferas.

169. Manómetros metálicos. — Manómetro de Bourdón. — Los *manómetros metálicos* son los verdaderamente industriales. Estos aparatos no contienen mercurio y estando hechos de metal por entero, son portátiles, poco molestos y de precio relativamente muy barato.

El primero de estos instrumentos, y el que más se usa todavía, fué el de Bourdón.

Este aparato se compone de un tubo de acero de paredes delgadas y flexibles (fig. 181, II) encorvado en circunferencia. Su sección es una

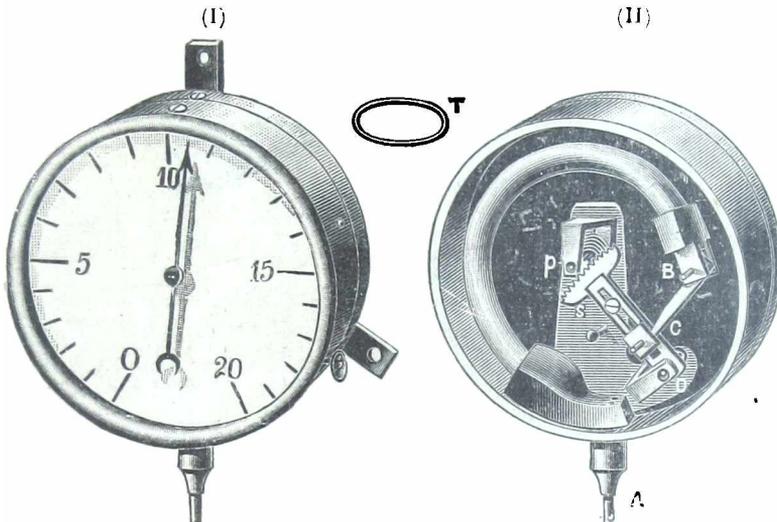


Fig. 181.

elipse T. La extremidad A, que está abierta, comunica con el recipiente donde se quiere medir la presión. La extremidad B está cerrada, pero libre como todo lo restante del tubo.

La presión que se ejerce sobre las paredes interiores del tubo le obliga a desarrollarse. Entonces la extremidad B es arrastrada de izquierda a derecha. Este movimiento se transmite por el vástago articulado BC a otro OS, móvil al rededor del eje O, que tiene en S un sector dentado que engrana con un piñón p. El eje de este piñón lleva una aguja que marca en un cuadrante (fig. 181, I) la tensión en atmósferas o en kg. por cm².

Este cuadrante se gradúa por comparación, sea con cualquier otro manómetro de escala conocida, sea con un manómetro de aire libre.

OBSERVACIÓN. — Estos aparatos tienen el inconveniente de ir volviéndose más y más inexactos a medida que se les usa. Los órganos metálicos que los constituyen experimentan, bajo la acción de los vapores calientes, alteraciones en su elasticidad que hacen inexactas sus medidas. De manera que resulta indispensable renovar la graduación de tiempo en tiempo.

170. **Manómetros registradores.** — Los manómetros metálicos se transforman fácilmente en aparatos registradores. Basta transmitir los movimientos del extremo del tubo, por palancas amplificadoras, a una aguja que lleva una pluma móvil sobre un tambor giratorio.

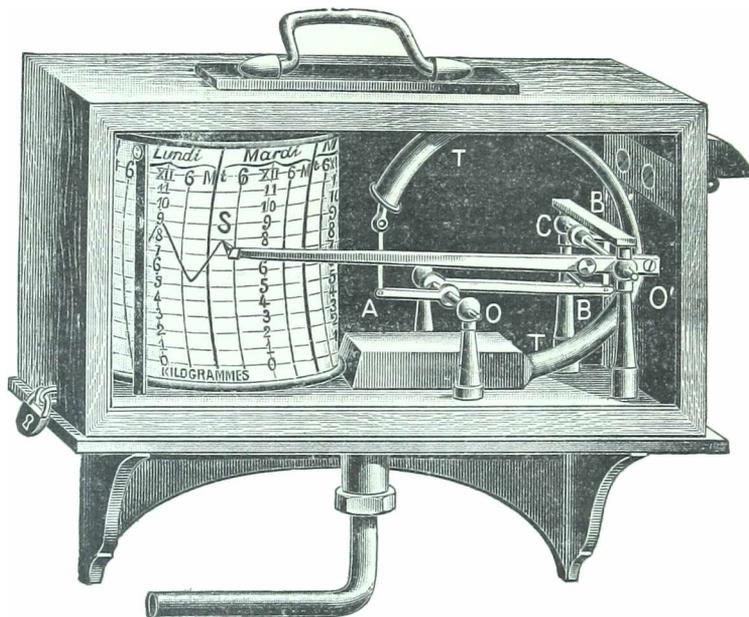


Fig. 182.

torio. De este modo, por el examen de la curva inscrita, se puede comprobar la marcha de la presión, en una caldera, por ejemplo, después de pasada.

Manómetro Richard. — Los movimientos del tubo manométrico TT (fig. 182) son transmitidos a la aguja y ampliados por medio de la palanca AB, móvil alrededor del eje O, de la varilla articulada BB' y de la B'C que está fija en el eje O' de la aguja O'S.

CAPÍTULO II

COMPRESIBILIDAD DE LOS GASES.

LEY DE MARIOTTE. — MEZCLA DE LOS GASES.

DIFUSIÓN DE LOS GASES. DISOLUCIÓN DE LOS GASES EN LOS LÍQUIDOS

171. **Ley de Mariotte.** — Encerremos un volumen determinado de aire en un cuerpo de bomba, encima de un émbolo (fig 1), y ejerzamos presión sobre el émbolo; el volumen disminuirá; pero notaremos que hay que ejercer un esfuerzo tanto mayor, cuanto más pequeño se vuelve el volumen. De ahí, deducimos que la presión del gas, que tiende a rechazar el émbolo, aumenta cuando el volumen del gas disminuye. Si,

al contrario, se levantara el émbolo de manera que aumentara el volumen del gas, disminuiría la presión.

Mariotte, en Francia, y, en Inglaterra, Boyle establecieron, por experimentación, y casi simultáneamente, la siguiente ley, llamada, en Francia, *ley de Mariotte* :

El volumen de una masa de gas es, a la misma temperatura, inversamente proporcional a su presión.

Esta ley quiere decir que si la presión se hace 2, 3, 4, veces mayor, el volumen se vuelve 2, 3, 4 veces más pequeño y reciprocamente.

Expresión algébrica de la ley. — Por lo tanto, si designamos por v y v' los volúmenes de la misma masa de gas, bajo dos presiones p y p' , tendremos :

$$\frac{v}{v'} = \frac{p'}{p}, \quad \text{o} \quad pv = p'v'.$$

Y si v'' v''' ... expresan los volúmenes a las presiones p'' p''' ... podremos decir que

$$\frac{v}{v''} = \frac{p''}{p} \quad \text{y} \quad \frac{v}{v'''} = \frac{p'''}{p};$$

de donde $pv = p''v''$ y $pv = p'''v'''$.

Luego $pv = p'v' = p''v'' = p'''v''' = \dots = \text{constante}$.

Por consiguiente, la ley de Mariotte puede enunciarse así :

A una misma temperatura, el producto del número que mide la presión de una masa de gas por el número que mide su volumen es constante, cualquiera que sea la presión.

172. Variación de la densidad de un gas con su presión. — *La densidad de una masa dada de gas es, a temperatura constante, proporcional a su presión.*

En efecto, cuando la presión aumenta, el volumen del gas disminuye; por lo tanto, su densidad tiene que aumentar, y, como la densidad de la masa de gas varía en razón inversa de su volumen, debe ser, pues, proporcional a su presión.

O, en términos más precisos, llamemos d y d' a las densidades de la masa de gas a las presiones p y p' , y sean v , v' los volúmenes que la masa de gas ocupa bajo las mismas presiones. Tendremos :

$$\frac{d}{d'} = \frac{v'}{v}, \quad \text{de donde} \quad \frac{d}{d'} = \frac{p}{p'}.$$

173. Estudio experimental. — Para estudiar experimentalmente la variación del volumen de un gas, en función de su presión, puede emplearse el siguiente procedimiento. Un tubo A (fig. 183), provisto de un grifo r , colocado en su parte superior, se gradúa de manera que se conozca el volumen comprendido entre r y una división cualquiera*.

* Esta graduación puede efectuarse acompañando al tubo de una graduación cualquiera, en partes de igual longitud, por ejemplo; luego, se pesan los pesos de mercurio que llenan el tubo desde r hasta las distintas divisiones. Los volúmenes de las divisiones, desde r , son proporcionales a las masas de mercurio así determinadas. Por otra parte,

Por medio de un tubo de caucho, A comunica con un segundo tubo B. El aparato se halla colocado en un soporte adecuado, de modo que B pueda subirse o bajarse a voluntad.

Para operar con el aire atmosférico, después de abrir el grifo r y de colocar los dos tubos A y B a la misma altura, se vierte mercurio en B, hasta que A esté a medio llenar de mercurio; luego, se cierra el grifo r . En este momento, la presión del aire que reside en A es igual a la presión atmosférica y los niveles en A y en B se hallan en el mismo plano horizontal. Se lee, en el aire, el volumen v , y se mide la presión atmosférica p por medio de un barómetro.

Levántase el tubo B hasta B' (fig. 184). El peso del mercurio ejerce presión en el gas, cuyo volumen disminuye. Al mismo tiempo, aumenta la presión, y el nivel en B' es más elevado que en A'. Se mide el

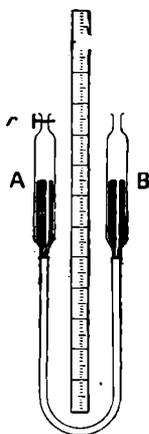


Fig. 183.

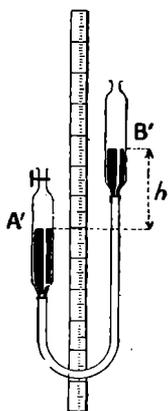


Fig. 184.

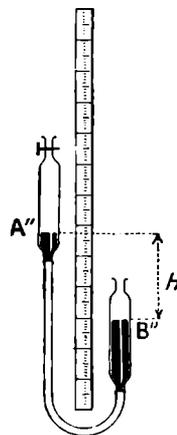


Fig. 185.

volumen v' del aire; luego, por medio de una escala graduada o mejor aún, de un catetómetro, se determina la diferencia de nivel h , que se añade a la altura barométrica. De este modo, se obtiene la presión p' del gas*. Se repiten las mismas medidas variando la altura del tubo B.

Si, en vez de elevar el tubo B, lo hacemos descender por debajo de A, hasta B'' (fig. 185), el volumen del gas aumenta en A. Al mismo tiempo, el nivel del mercurio está más bajo en B'' que en A'', lo que prueba que la presión de aire es menor que la presión atmosférica. Se obtiene, restando de la altura barométrica la diferencia de nivel entre A'' y B''. Se efectúan varios experimentos colocando el tubo B a

no hace falta conocer el volumen absoluto de una división; pues basta conocer las relaciones de los volúmenes de las diversas divisiones. Se toma el volumen de una de ellas, de la primera, por ejemplo, como unidad, y se expresan los volúmenes del tubo a partir de r hasta las demás divisiones, en función del volumen de la división tomada como unidad.

* Antes de efectuar estas medidas, hay que esperar un poco, porque el gas, al comprimirse, se calienta, y, en este caso, su presión es más grande, en igualdad de volumen, que si la temperatura hubiera permanecido constante. Si se aumenta el volumen del gas, se produce lo contrario.

diversas alturas por debajo de A y midiendo, en cada experimento, el volumen del aire y su presión.

Para operar con un gas distinto del aire se llena por completo de mercurio el tubo A, levantando el tubo B, después de abrir el grifo *r*. Luego, se une, con un tubo de caucho, el extremo superior *r* a un recipiente que contenga el gas por estudiar. Se baja, luego, B, y el mercurio desciende a A o penetra en el gas.

Resultados de las medidas. — Hallados, de este modo, los volúmenes $v, v', v'', v'''\dots$ de la masa de gas, para las presiones $p, p', p'', p'''\dots$, se efectúan los productos $pv, p'v', p''v'', p'''v'''\dots$ y se ve que estos productos son iguales, o, mejor dicho, que sólo se diferencian entre sí en pequeñas cantidades, que pueden achacarse a errores del experimento. Por consiguiente, esto demuestra la ley de Mariotte.

Método gráfico. — Llevemos, como abscisas, a un diagrama (fig. 186) las presiones p, p', p'', p''' , y como ordenadas, los productos $pv, p'v', p''v'', p'''v'''$.

De este modo, tendremos los puntos A, B, C, D, que representan los experimentos que acabamos de efectuar. Si la ley de Mariotte es exacta y los experimentos verificados no presentan ningún error, estos puntos deben hallarse en una misma recta, paralela al eje Op .

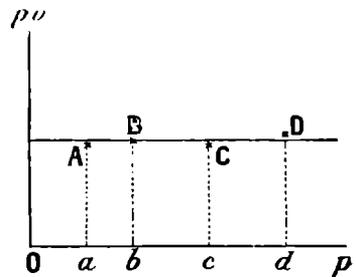


Fig. 186.

En realidad, se nota que dichos puntos se colocan unos un poco más abajo y otros más arriba de tal recta; pero estas separaciones deben atribuirse a errores de medición, porque, cuanto más exactas son las medidas, tanto menores son estas separaciones y la línea que une los puntos A, B, C, D se aproxima más a una recta paralela a Op .

ORSEVACIÓN. — El aparato precedente puede servir para estudiar la compresibilidad de un gas a diversas temperaturas. Para esto, basta rodear el tubo A de una manga que contenga agua más o menos caliente. Se ve que los distintos gases cumplen la ley de Mariotte a temperaturas más o menos elevadas.

4. Estudio crítico de la ley de Mariotte. — Estos experimentos no permiten hacer variar mucho la presión. Además tampoco son susceptibles de gran exactitud, a lo menos, en cuanto a la medida de los volúmenes de los gases. En efecto, cuando se aumenta la presión, el volumen disminuye, y la medida se hace cada vez menos precisa.

Después de Mariotte y Boyle, otros muchos físicos estudiaron la compresibilidad de los gases. Regnault, particularmente, publicó en 1817 experimentos que formaron época en la ciencia.

I. Experimento de Regnault. — Regnault suprimió esta causa de error creciente operando, no con una misma masa de gas, sino con masas de gas variables, cuyos volúmenes eran reducidos sucesivamente en proporción constante, de 2 a 1 poco más o menos. Se llenaba primero el volumen total V_0 del manómetro con cierta masa de gas a la presión P_0 ; después se comprimía el gas por medio de la bomba de mercurio hasta

* Para construir semejantes *diagramas* o *gráficos*, el papel más cómodo es el cuadrículado en milímetros, de uso corriente, en el comercio.

reducir su volumen a V_1 ($V_1 = \frac{1}{2} V_0$ próximamente), y so media a presión final P_1 , dada por la distancia vertical de los dos niveles de mercurio. Esto constituía una primera serie de medidas. Efectuábase otra llenando de nuevo el volumen V_0 con otra masa del mismo gas; a la presión P'_0 ; reduciase el volumen a V_1 (o V'_1 , algo distinto de V_1), y se media una presión final P'_1 , y así sucesivamente. Operando de este modo, siempre con los mismos volúmenes V_0 y $\frac{1}{2} V_0$ bastante considerables, el error absoluto era muy pequeño, y el relativo, constante: *de manera que la sensibilidad del método no iba disminuyendo.*

La precisión del método aumentó más todavía por efecto de cierto número de correcciones: *barométrica, compresibilidad, temperatura.*

Resultados. — Si la ley de Mariotte se aplicara a un gas determinado, deberíamos tener para toda la serie de las medidas que le conciernen, la ecuación

$$\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} = 1.$$

Por el contrario, si el gas fuera *más compresible* de lo que indica la ley de Mariotte se debería tener

$$\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} > 1,$$

Finalmente, si el gas fuera *menos compresible*, se debería tener:

$$\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} < 1, \quad \text{o bien} \quad \frac{V_0 P_0}{V_1 P_1} = 1 + \epsilon.$$

La comparación de los resultados numéricos de sus medidas condujo a Regnault a las conclusiones siguientes:

1º Para ninguno de los cuatro gases que había estudiado (aire, nitrógeno, anhídrido carbónico, hidrógeno), el cociente $\frac{V_0 P_0}{V_1 P_1}$ no es igual a 1: *luego ninguno obedece rigurosamente la ley de Mariotte.* La diferencia era despreciable para débiles presiones; pero se acentúa más a medida que aumenta la presión del gas.

2º ϵ positivo para el aire, el nitrógeno y el ácido carbónico: *luego estas tres gases son más compresibles de lo que indica la ley de Mariotte.* Para el hidrógeno ϵ es negativo: *luego este gas es menos compresible*; pero la divergencia disminuye cuando la presión aumenta, al contrario de lo que ocurre con los demás gases.

3º Todos los demás gases estudiados por Regnault se conducen como el aire, siendo *más compresibles* de lo que indica la ley de Mariotte. La divergencia es mucho mayor en los gases liquidables, tales como el ácido carbónico, el ácido sulfuroso, el gas amoníaco, el cianógeno, que en los gases llamados *antaoño permanentes.*

II. *Experimentos de Natterer.* — Natterer, físico de Viena, operó en 1851 hasta con 2 700 atmósferas al tratar de reducir a líquidos los gases llamados entonces *permanentes.* Aunque sus métodos no eran susceptibles de gran precisión, llegó a obtener este importante resultado: el aire, el oxígeno, el nitrógeno y el óxido de carbono, que empiezan por comprimirse *más* de lo indicado por la ley de Mariotte, acaban al contrario, cuando son grandes las presiones, por hacer, como el hidrógeno, que se comprimen *menos* de lo indicado por la ley.

III. *Experimentos de Cailletet.* — Este resultado fué confirmado más tarde por Cailletet en los notables experimentos que hizo en 1879 en el pozo artesiano de la Butte-aux-Cailles, logrando realizar la compresión del nitrógeno hasta 240 atmósferas. Así halló el *mínimum* del producto PV bajo una presión de 80 atmósferas poco más o menos.

175. *Experimentos de Amagat.* — Las primeras experiencias de Amagat, también sobre el nitrógeno (1879), se hicieron en un pozo de mina (el de Verpillieux) cerca de Saint-Etienne.

El aparato (fig. 187) estaba instalado en una galería subterránea, a 327 metros por debajo de la superficie del suelo. Una bomba SSP repelia (por mediación de agua mezclada con glicerina) al mercurio R, colocado en el depósito sobre el cual aquélla está montada, por una parte en el piezómetro A donde está el gas y que se ve a la izquierda, y por otra parte en un tubo de acero, cuyo principio CO es lo único perceptible en el dibujo: este tubo, hecho con pedazos reunidos por enlaces de tuercas (representamos la primera TT'), estaba sujeto a las paredes del pozo en toda su longitud; la lectura de los volúmenes se efectuaba pues directamente en el vástago graduado del piezómetro. Para medir la altura de la columna de mercurio subían los ayudantes en el canasto de la mina hasta cada enlace d , lo deshacían y atornillaban en vez de la tuerca

superior una pieza que sostenía un tubo de vidrio *b*; entonces se daba a la bomba hasta que el mercurio llegara a este tubo; una vez establecido el equilibrio de temperatura y leído el volumen, el ayudante rehacía el enlace, subía a la estación siguiente y

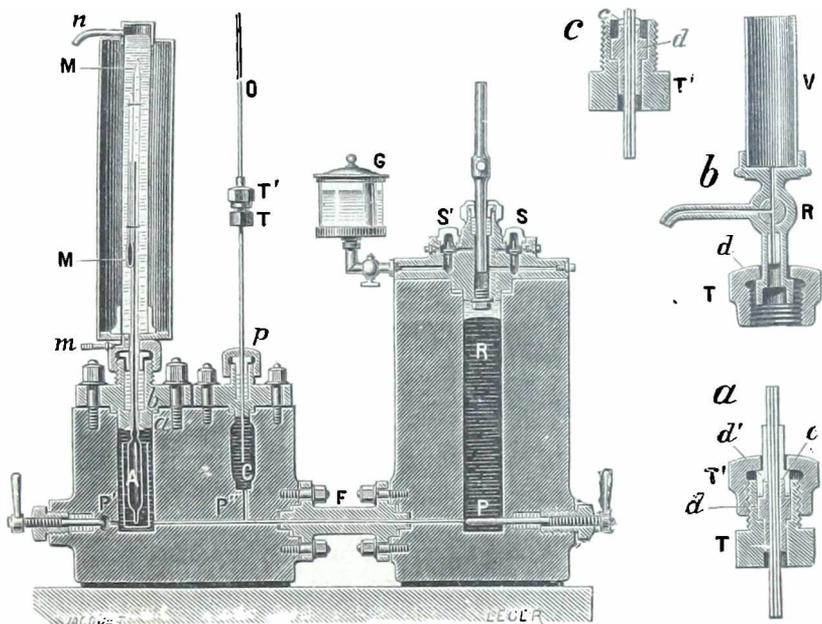
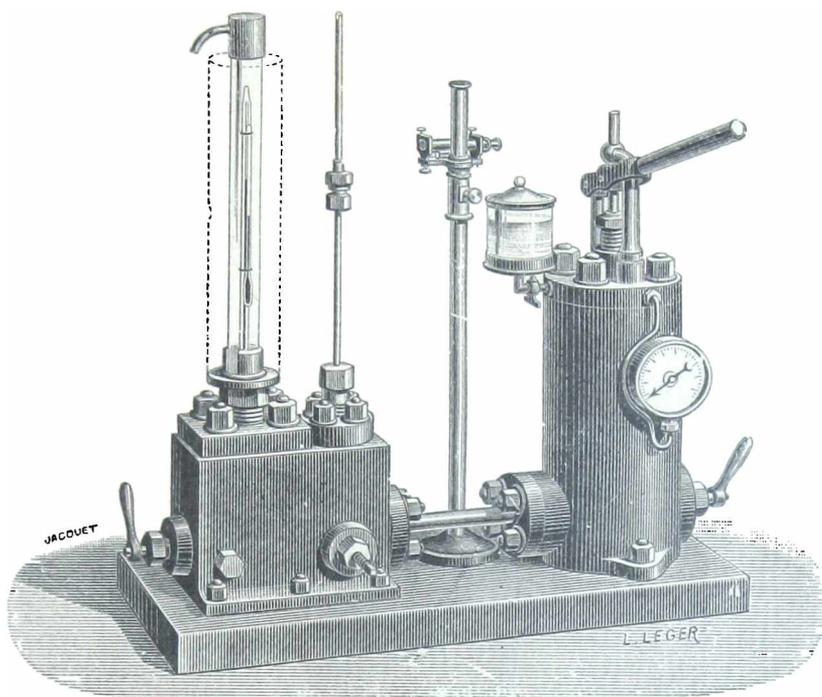


Fig. 187.

así en lo sucesivo. La temperatura de la columna estaba dada por una serie de termómetros escalonados en los enlaces sucesivos, la del gas por el termómetro del tubo envolvente MM, que rodeaba el vástago graduado y por el cual pasaba continuamente

una corriente de agua. Para las presiones inferiores a 80 atmósferas se hicieron las experiencias con arreglo al mismo método en una de las torres de la iglesia de Fourvière en Lyon. El conjunto de los resultados obtenidos se encuentra en el cuadro siguiente :

P	PV	P	PV	P	PV	P	PV
atm.		atm.		atm.		atm.	
1,00	1,0000	65,80	0,9897	68,810	1,0293	500	1,3768
26,32	0,9930	72,37	8,9902	208,63	1,0557	1 000	2,0160
32,90	0,9919	78,95	0,9908	251,13	1,0875	1 500	2,6258
39,47	0,9908	85,53	0,9913	290,93	1,1254	2 000	3,2093
46,05	0,9899	90,97	0,9929	332,04	1,1668	2 500	3,7708
52,63	0,9896	109,17	0,9975	373,30	1,2110	3 000	4,3138
59,21	0,9895	126,90	1,0248	430,77	1,2740	—	—

Otros gases. — Conocida la compresibilidad del nitrógeno, Amagat pudo estudiar por comparación en el laboratorio la de otros diversos gases : hidrógeno, oxígeno, aire, óxido de carbono, formeno, etileno, ácido carbónico; a todos estos gases corresponde a la temperatura ambiente (excepto a los dos últimos que se licuidan, el ácido carbónico por debajo de 30° y el etileno por debajo de 10°) un *minimum* del producto PV, no contando al hidrógeno, con el cual va siempre aumentando ese producto. El cuadro suplementario que indica la continuación de esos productos para el ázoe hasta 3 000 atmósferas está tomado de otro trabajo de Amagat. Obsérvase que con esta presión, el producto PV (y en consecuencia la presión para el volumen correspondiente) es cuatro veces mayor que si el gas siguiera la ley de Mariotte; para el hidrógeno sólo parece ser de 2,8754. Por tanto, este gas, que al principio es menos compresible que el nitrógeno, se vuelve al contrario más compresible que éste bajo presiones considerables; a 3 000 atmósferas, los coeficientes de compresibilidad de los gases, nitrógeno, aire, oxígeno, difieren muy poco y son del orden de magnitud de los coeficientes de los líquidos; bajo esta presión, la densidad del nitrógeno referida a la del agua es 0,839, la del hidrógeno 0,090, la del oxígeno 1,128, la del aire 0,897.

176. *Compresibilidad a las diversas temperaturas.* — Los experimentos que acabamos de describir fueron efectuados a la temperatura ambiente; ya en 1869 estudió Andrews el ácido carbónico a diversas temperaturas comprendidas entre 10° y 50°. Como estos trabajos tuvieron por principal objeto la continuidad del paso del estado líquido al gaseoso, volveremos a examinarlos cuando se trate del punto crítico; por lo demás, fueron efectuados dentro de límites de temperatura y de presión demasiado estrechos para que puedan expresar el conjunto de las leyes de la compresibilidad propiamente dicha.

Experimentos de Amagat. — Amagat emprendió el mismo estudio, en límites muy extensos de presión y temperatura. En sus investigaciones, ha seguido, según los casos, varios métodos adecuados a cada uno. Las presiones, que llegaron hasta 3 000 atmósferas, las medía con un manómetro Desgoffes perfeccionado.

Más adelante (323) volveremos a tratar de los resultados de estos experimentos. Ahora, sólo diremos que han evidenciado el principio de que cuando los gases son sometidos a temperaturas cada vez más elevadas, el *minimum* del producto PV se acentúa cada vez menos. Cuando se aumenta las temperaturas de los diversos gases, éstos tienden hacia propiedades análogas a las del hidrógeno; pero, a 200° y 300° se hallan aún muy distantes de ellas.

177. *Mezcla de los gases o difusión.* — A consecuencia de su expansibilidad, los gases, puestos en contacto, se mezclan por sí mismos y permanecen mezclados indefinidamente. En esto consiste la *difusión de los gases*.

1° *Experimento de Berthollet.* — Este fenómeno fué estudiado por Berthollet, en un experimento célebre. Tomó dos matraces de vidrio (fig. 188) provistos ambos de un gollete de llave que permitía atornillarlos uno encima de otro; llenólos de gases perfectamente secos, uno

de hidrógeno y el otro de anhídrido carbónico, cuya densidad es 22 veces mayor: finalmente los colocó de la manera que se ve en la figura en los sótanos del Observatorio, para preservarlos de toda agitación y de las variaciones de temperatura. No se abrieron las llaves hasta que pasó algún tiempo, cuando ya los gases estaban en equilibrio de temperatura con el medio ambiente. Así pues, al cabo de algunas horas separó Berthollet los dos matraces y observó: 1º, que *cada uno de ellos contenía proporciones iguales de hidrógeno y de ácido carbónico*; 2º que *la presión de la mezcla gaseosa en cada matraz era igual a la presión inicial*.

Sometiendo a una prueba análoga todos los gases que no ejercen entre sí ninguna acción química, se obtiene el mismo resultado. La experiencia demuestra por otra parte que, *una vez mezclados, los gases no vuelven a separarse, sea cual fuere la diferencia de sus densidades y que mientras mayor es ésta, más rápida es su difusión recíproca: el gas más denso es el menos difusible*. Por ejemplo, el hidrógeno se difunde en dirección descendente unas cinco veces más de prisa que el anhídrido carbónico en la ascendente.

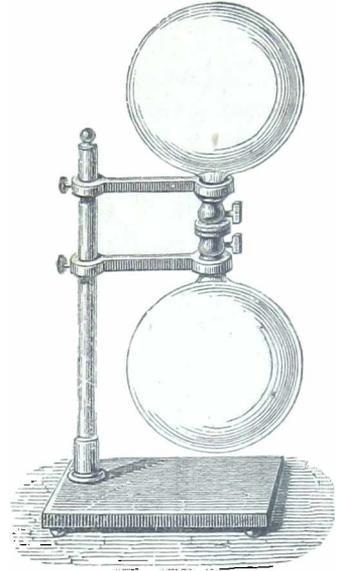


Fig. 188.

2º LEYES DE LA MEZCLA DE LOS GASES. — Por último, se puede también enunciar la ley siguiente.

Si la temperatura permanece constante, *la presión final de la mezcla de varios gases es igual a la suma de las presiones que tendría cada uno de ellos si ocupara solo el volumen total*.

El experimento de Berthollet prueba esta ley. Basta observar que, siendo H la presión inicial de cada gas, dado el volumen v de un matraz únicamente, la presión final que cada uno de ellos ocuparía si llenara por sí solo la capacidad $2v$ de los dos matraces, sería $\frac{H}{2}$; y la suma de estas dos presiones es en efecto H , según Berthollet observó.

3º *Fórmula algebraica de la ley*. — Sean v, v', v'' , los volúmenes de varias masas de gases sin acción química unos sobre otros, p, p', p'' , sus presiones respectivas y V el volumen del vaso donde se hace la mezcla. Estos gases al pasar respectivamente de los volúmenes v, v', v'' ... al volumen V , adquieren respectivamente presiones, que, según la ley de Mariotte, son:

$$\frac{pv}{V}, \quad \frac{p'v'}{V}, \quad \frac{p''v''}{V}.$$

Sea P la presión de la mezcla, se tiene según la ley enunciada.

$$P = \frac{pv + p'v' + p''v''}{V} + \dots \quad [1]$$

de donde

$$PV = pv + p'v' + p''v'' + \dots = \Sigma (pv). \quad [2]$$

Caso particular. -- En el caso de que $p = p' = p'' = \dots$ y en que $V = v + v' + v'' + \dots$ so tiene

$$P = \frac{p(v + v' + v'' + \dots)}{v + v' + v'' + \dots} = p$$

es decir que la presión de la mezcla es la misma que la de los gases antes de mezclarse ; así ocurría en la experiencia de Berthollet.

178. Difusión de los gases a través de las paredes porosas y los pequeños orificios. — LEY DE GRAHAM. — Cuando dos masas de gas están separadas por una pared con pequeño orificio o por un tabique de

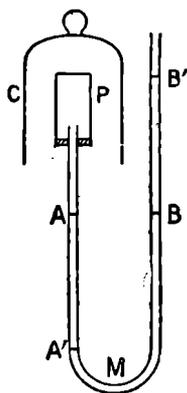


Fig. 189.

substancia porosa, los gases se difunden unos en otros ; pero, difundiéndose más pronto el menos denso. Este hecho puede ser comprobado por el experimento siguiente ;

Supongamos un vaso poroso P lleno de aire (fig. 189), cuya presión puede ser indicada por un manómetro de agua M. Al principio los niveles A y B del líquido están en un mismo plano horizontal. Pero si se cubre el vaso P con una campana C llena de hidrógeno, resulta un desnivel A'B' indicando un aumento de presión dentro del vaso : esto obedece a que el hidrógeno ha pasado más pronto que el aire a través de la pared porosa.

Este fenómeno fué estudiado por Graham, que enunció la ley siguiente : *La velocidad de difusión de un gas a través de una pared porosa o de un pequeño orificio, es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su densidad.*

179. Disolución de los gases por los líquidos. — Los líquidos tienen la propiedad de absorber los gases en proporciones más o menos grandes : en esto consiste el fenómeno de la *disolución*.

Leyes. — Estas leyes se refieren a la disolución de los gases en los líquidos sin acción química sobre ellos. Las leyes de la disolución de los gases en los líquidos (que no ejercen acción química sobre ellos) fueron descubiertas y enunciadas hace ya mucho tiempo por Henry (de Manchester) y por Dalton ; más adelante las comprobó y precisó Bunsen.

1º LEY DE HENRY. — *Cuando un gaz se encuentra en contacto con un líquido que lo disuelve, se establece una relación constante, dada la misma temperatura, entre el volumen del gas disuelto, medido a la presión final de la atmósfera gaseosa, y el volumen disolvente.*

Coefficiente de solubilidad. — Esta relación constante (quiere decir, independiente de la presión final) para un mismo líquido y un mismo gas, se llama *coeficiente de solubilidad*.

2º LEY DE DALTON. — *Cuando una mezcla de varios gases está en contacto con un disolvente, cada uno de los gases se disuelve en ella como si ocupara solo el volumen de la mezcla.*

Cuanto a la presión final, relativa a cada uno de los gases, *es la presión que posee este gas en la mezcla gaseosa no disuelta.*

Consideremos, por ejemplo, el caso del aire atmosférico El oxígeno

no forma sino $\frac{1}{5}$ próximamente de un volumen; pues bien el agua absorbe en las condiciones ordinarias la misma cantidad de oxígeno que si la atmósfera toda se encontrara formada por este gas, bajo una presión igual a $\frac{1}{5}$ de la presión atmosférica.

3º *Variación de coeficiente de solubilidad con la temperatura.* — El coeficiente de solubilidad de un gas disminuye siempre que la temperatura aumenta. Se hace nulo antes de que el líquido llegue a su temperatura de ebullición. De aquí resulta que, cuando se calienta un líquido que lleva en disolución un gas, este gas se desprende.

CAPÍTULO III

PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES APLICADO A LOS GASES. AERÓSTATOS

180. **Aplicación del principio de Arquímedes a los gases.** — Por ser todos los gases pesados, ejercen, como los líquidos en equilibrio, fuerzas normales sobre los sólidos sumergidos en ellos. Estas fuerzas tienen una resultante que, al igual que en los líquidos, se determina por el principio de Arquímedes, que se puede generalizar en esta forma :

Cuando un cuerpo sólido se halla enteramente sumergido en un fluido en equilibrio, las fuerzas de presión que en su superficie se ejercen tienen una resultante única, igual y directamente opuesta al peso del volumen fluido desalojado, y aplicada al centro de gravedad de este volumen.

Este principio se puede demostrar *a priori* para los gases, lo mismo que se ha demostrado para los líquidos (136).

También puede establecerse por la experimentación. Por ejemplo, suspendamos el globo, de uno de los platillos de la balanza (fig. 190). El globo se halla en un recipiente V, cerrado por una tapa, provisto de un estrecho orificio para que pase el hilo de suspensión del globo y atravesado por un tubo T. Una vez lleno de aire el recipiente

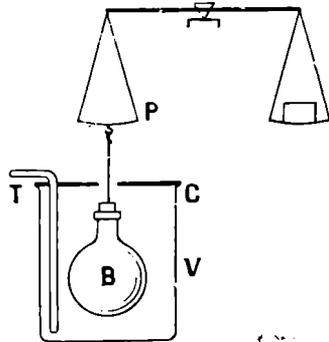


Fig. 190.

V, se hace la tara. Introduzcamos, por el tubo T, gas ácido carbónico, para expulsar el aire. La balanza se inclinará por la parte de la tara. Sabemos que el anhídrido carbónico es más denso que el aire; si el principio de Arquímedes es exacto, el globo ha debido, por consiguiente,

sufrir un empuje más grande que en el aire. Lo cual se produce, en efecto; puesto que el globo se eleva. Si, al contrario, se introduce hidrógeno, que es menos denso que el aire, la balanza se inclinará hacia el lado del globo. Débese esto a que, en este caso, el empuje del aire ha sido reemplazado por otro empuje más pequeño.

181. **Peso real y peso aparente.** — Corrección de las pesadas efectuadas en el aire. — Los cuerpos, en el aire, *parece que pierden* una parte de su peso igual al peso del aire que desalojan : se debe, pues, distinguir, entre su *peso real*, es decir, su *peso en el vacío*, y su *peso aparente*, esto es, su *peso en el aire*. La balanza sólo indica la igualdad entre el peso aparente del cuerpo que se trata de pesar y el de las pesas. Pero, de la observación del equilibrio de la balanza, puede deducirse la masa del cuerpo.

Sea m la masa del cuerpo buscada, expresada en gramos; d , su densidad; a , la masa de 1 cm^3 de aire en las condiciones de temperatura y presión en que se ha realizado la pesada. El peso real del cuerpo es mg ; pero, como su volumen es $\frac{m}{d}$, hay que restar de él el peso $\frac{m}{d} ag$ del aire desalojado; la fuerza que actúa sobre la balanza, el *peso aparente*, es pues :

$$mg - \frac{m}{d} ag = m \left(1 - \frac{a}{d} \right) g.$$

Del mismo modo : sean M la masa de las pesas y d' su densidad.

El peso aparente es $M \left(1 - \frac{a}{d'} \right)$. Luego

$$m \left(1 - \frac{a}{d} \right) g = M \left(1 - \frac{a}{d'} \right) g, \quad \text{de donde} \quad m = M \frac{1 - \frac{a}{d'}}{1 - \frac{a}{d}}.$$

La masa M de las pesas es la que hay marcada en ellas; puesto que éstas han sido establecidas por pesadas corregidas del empuje del aire. En cuanto al valor de a , es, poco más o menos, 0,0013 (260).

Orden de magnitud de la corrección. — Supongamos que pesando, en el aire, un trozo de aluminio ($d = 2,56$) se encuentre, con pesas de latón ($d' = 8,44$), $M = 20,231$, se ve que, tomando $a = 0,0013$, $m = 20,238$. La corrección que debe hacerse es, pues, de 7 miligramos. Por lo tanto, esta corrección es necesaria, si se quiere valuar el peso en miligramos; pero, sería absurda, si se pesa por decigramos.

182. **Equilibrio de los cuerpos sumergidos en la atmósfera.** — Todo cuanto se ha dicho acerca de los cuerpos sumergidos en líquidos puede aplicarse a los cuerpos sumergidos en el aire o en cualquier otro gas. El cuerpo se halla sometido a dos fuerzas verticales y opuestas : su peso y el empuje del aire. La resultante de ambas fuerzas es una fuerza vertical, de intensidad igual a la diferencia del peso y del empuje; y dirigida en el sentido de la mayor. Consideraremos tres casos :

1° *El peso es mayor que el empuje.* — Esto se presenta en un cuerpo homogéneo, cuando *el cuerpo es más denso que el aire*, que es el caso más general : el cuerpo cae al suelo, empujado por su peso aparente;

2° *El peso es igual al empuje* o, tratándose de un cuerpo homogéneo, *el cuerpo tiene la misma densidad que el aire* : el cuerpo y el empuje de abajo arriba se equilibran y el primero flota en la atmósfera;

3° *El peso es inferior al empuje*, o, para un cuerpo homogéneo, *el cuerpo es menos denso que el aire* : el empuje lo arrastra, y el cuerpo se eleva hasta que encuentra capas de aire de la misma densidad que él.

Estos dos últimos casos se aplican a los cuerpos que flotan en la atmósfera, entre los cuales se puede citar los aeróstatos.

183. **Aeróstatos : mongóltieras y globos.** — Los *aeróstatos* son unos globos de tela ligera e impermeable que llenos de un gas menos denso que el aire, se elevan en la atmósfera o se mantienen allí en equilibrio.

Los primeros aeróstatos se llenaron con aire caliente : llámaseles *montgolfieras* principalmente, en recuerdo de los hermanos Montgolfier, sus inventores. Hoy se utiliza con aquel fin el hidrógeno o el gas del alumbrado y se les llama de ordinario *globos*.

Los perfeccionamientos más importantes del invento de los Mont-

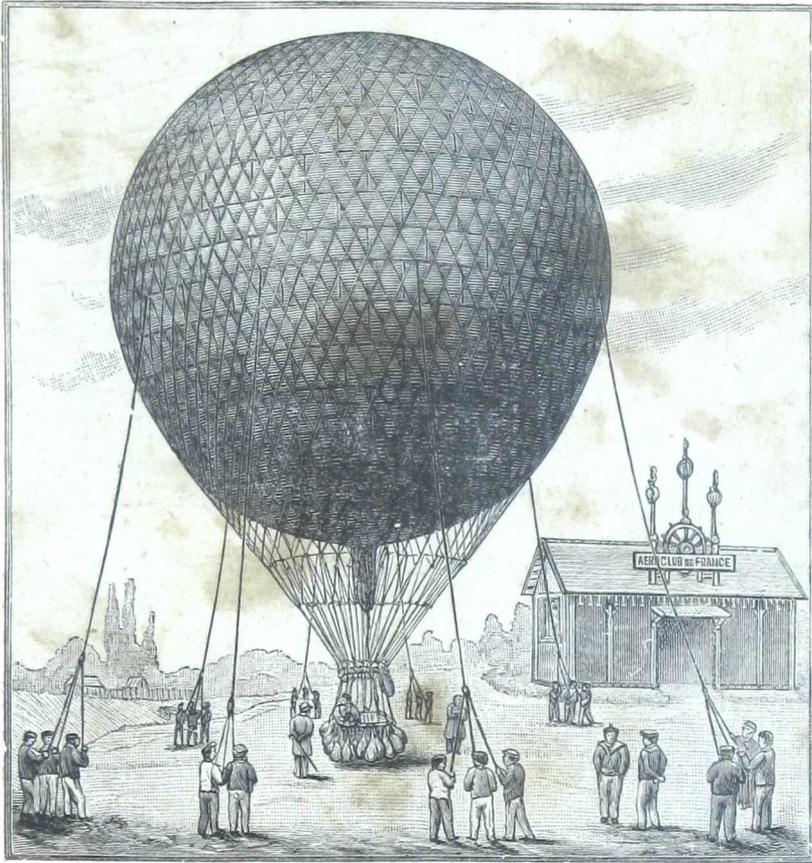


Fig. 191.

golfier fueron introducidos desde el principio por el físico Charles.

La primera forma que se dió a los aeróstatos fué la de un globo casi esférico, terminado en su parte inferior por un largo tubo llamado *manga*, por donde puede escapar el gas interior, en casos de dilatación exagerada. Además, todos los globos están provistos, en su parte superior, de otra abertura, cerrada por medio de una válvula de resorte. El aeronauta puede abrir a voluntad esta válvula, mediante una cuerda atada a ella, cuando quiere que baje e globo.

Las envolturas se construyen principalmente con seda de China o del Japón. Están cubiertas con un barniz de aceite de linaza. En los

globos muy grandes, se emplea también entretelas con interposición de hojas de caucho, y barnizado todo con una disolución de caucho. Asimismo, es conveniente darles una capa de pintura inactínica al cromo, que disminuye el recalentamiento por los rayos solares.

Todos los aeróstatos esféricos destinados a elevar aeronautas, están provistos de una red y una barquilla. Aquélla protege la envoltura, cuyo hemisferio superior entero cubre; algo por debajo del círculo ecuatorial se desprenden las cuerdas de la red apartándose de la superficie del globo, para ir a terminar y amarrarse en un círculo de madera muy dura, de tubo de acero de donde se cuelga la barquilla. Ésta se compone de una especie de cesto de mimbres mayor o menor, que contiene los accesorios e instrumentos que llevan los aeronautas : el *lastre*, el *barómetro*, la *cuerda*, etc.

El *lastre* se compone de cierto número de sacos de lona llenos de arena. Vaciano los sacos, según convenga, se puede regularizar la ascensión, moderar la velocidad del descenso o hacerla nula en el momento oportuno. Quanto al *barómetro*, es el compañero obligado de todas las ascensiones : la marcha de la columna barométrica es lo único que puede indicar al aeronauta, a partir de cierta altitud, si el globo sube o desciende.

Finalmente, lleva también una cuerda de unos cincuenta metros, con una o dos anclas.

Como el precio de coste del hidrógeno es algo elevado, se emplea, con frecuencia, el gas del alumbrado, a pesar de que tiene mucha mayor densidad.

OBSERVACIÓN. — En ningún caso se infla completamente el globo. De este modo, el gas interior se dilata libremente y sin peligro de ruptura de la cubierta, a medida que la presión exterior disminuye. Sin embargo, en un globo hinchado de modo incompleto, el desplazamiento de la masa gaseosa en su interior imprime al conjunto movimientos que pudieran ser peligrosos. Para remediarlo, se dispone en el interior del aeróstato un *globito*, especie de bolsa que comunica con el exterior y en la cual se introduce aire por medio de un ventilador. Cuando el globo se eleva a capas de aire en que la presión atmosférica es débil, el gas ejerce presión contra el globito, cuyo aire queda, de este modo, expelido. Si, por el contrario, el globo desciende, el volumen del gas disminuye; pero se mantiene tensa la cubierta hinchando el globito.

184. **Teoría de los aeróstatos. — Fuerza ascensional.** — Todo aeróstato que se encuentra en el seno de la atmósfera está sometido a dos fuerzas :

1º Su peso total P , fuerza vertical y dirigida de arriba abajo (gas, envoltura, barquilla, aeronautas, aparejos, instrumentos, etc.);

2º El empuje P' , fuerza vertical y dirigida de abajo arriba, que es igual al peso del volumen de aire desalojado por el aeróstato *entero*.

Si el empuje P' es mayor que el peso P , el aeróstato subirá en la atmósfera, bajo la influencia de una fuerza F , vertical y dirigida de

abajo arriba, igual a la diferencia $P' - P$. Esta fuerza se llama *fuerza ascensional* del aeróstato.

Basta que la fuerza F sea de 4 a 5 kilogramos en el momento de partir para que el aeróstato suba.

OBSERVACIÓN. — La fuerza ascensional permanece *sensiblemente constante* todo el tiempo que el globo está sin hincharse completamente por la dilatación del gas interior. En efecto, la presión atmosférica disminuye cuando el globo se eleva; pero el volumen del gas aumenta; lo mismo ocurre con el volumen del aire desalojado. El peso de este aire, que constituye el empuje, permanece constante porque, si la densidad del aire ha disminuido en cierta relación, su volumen ha aumentado en la misma proporción, en virtud de la ley de Mariotte.

Pero si el globo sigue subiendo una vez hinchado por completo, el gas se escapa por la manga; la fuerza ascensional decrece necesariamente hasta ser nula a una altitud más o menos grande.

Cálculo de la fuerza ascensional. — Supongamos un globo hinchado de hidrógeno a 10° y a la presión atmosférica normal: 1 metro cúbico de aire pesa, en estas condiciones, 1,247 kg (260); 1 m³ de hidrógeno pesa, en las mismas condiciones, $1,247 \times 0,069$. La diferencia entre el empuje sobre 1 m³ de hidrógeno y el peso de este gas es, pues $1,247 (1 - 0,069)$ o 1,161 kg. Tal es el peso que podrá levantar cada metro cúbico de hidrógeno. Luego si V es la capacidad del globo en metros cúbicos, π el peso total de los accesorios, sin tener en cuenta el volumen, la fuerza ascensional será

$$F = V \times 1,247 (1 - 0,069) - \pi.$$

Con un gas más denso, como el gas del alumbrado (densidad con relación al aire 0,55), cada metro cúbico a 10° no puede levantar más que $1,247 (1 - 0,55) = 0,560$ kg. Luego para levantar el mismo peso se necesita un globo más grande.

Al partir, la fuerza ascensional varía con la temperatura y la presión: disminuye cuando la presión disminuye y la temperatura sube.

Se puede calcular fácilmente, según la fórmula que da la masa de un volumen conocido de gas (260).

185. Navegación aérea o dirección de los globos. — **Globos dirigibles.** — El aeronauta, con los medios de que dispone, no puede ejercer acción sino sobre la fuerza ascensional del globo aerostático, de modo a disminuir o aumentar su movimiento en sentido vertical; pero los movimientos en sentido horizontal están sometidos por completo a los vientos que reinan en la región en que se encuentra.

Será dirigible un globo aerostático, si se halla provisto de una hélice movida por un motor y capaz de imprimirle, en completa calma, una velocidad superior a la de los vientos a que deba vencer. Además, debe poseer un timón que le permita evolucionar a su antojo.

1.ª Reseña histórica. — Los primeros ensayos serios de navegación aérea se deben al ingeniero Giffard en 1852 y 1854; después a Dupuis de Lôme y a los hermanos Tissandier. Pero los primeros resultados realmente satisfactorios fueron obtenidos por Renard y Krebs, que, empleando un motor eléctrico, movido por pilas ligeras, lograron dar a su aeróstato, la *France*, una velocidad propia de 5 a 6 metros. Así consiguieron, por primera vez en 1883, efectuar un viaje volviendo al punto de salida.

La cuestión ha tomado nuevo giro con motivo de los perfeccionamientos introducidos en los motores de explosión, que los convierten en máquinas de gran potencia con peso y volumen reducidos.

2.ª Forma de los dirigibles. — Para dar al globo la mayor velocidad que sea compatible con la potencia del motor, es preciso reducir cuanto sea posible la resistencia del aire. Por de pronto, para inflar los dirigibles se usa siempre el hidrógeno, porque así queda reducido a su mínimo el volumen de gas necesario para levantar el globo. Por otra parte, se le da al globo una forma oblonga, puntiaguda por detrás (fig. 192).

3.ª Permanencia de la forma. — Para que la resistencia no modifique la forma del globo durante la marcha, conviene que la envoltura permanezca rígida. Esta condición es de suma importancia, pues de lo contrario los movimientos que adquiriría la masa gaseosa trasladarían sin cesar el punto de aplicación del empuje, lo cual produciría

movimientos de balance peligrosos. En los globos del conde Zeppelin, esta permanencia de la forma está asegurada por una armazón interior de aluminio; pero el peso de esta armazón es grande, y por tanto debe de ser grande también el volumen del globo. Lo más frecuente es emplear el dispositivo ya descrito del globito de aire, cosido en el interior de la envoltura y comunicando con el exterior por una válvula que un muellecito mantiene cerrada. Al partir, se llena de aire el globito, ocupando el hidrógeno el resto de la capacidad de la envoltura. Cuando sube el globo, el gas oprime el globito, y se escapa una parte del aire. Cuando el globo baja, se introduce aire en el globito por medio de un ventilador.

4.º *Estabilidad longitudinal.* — Un dirigible tiene siempre una tendencia a marchar con el frente levantado. Esto consiste en que las hélices ejercen sobre la barquilla fuerzas dirigidas de atrás hacia adelante, mientras que el aire ejerce sobre la envoltura una fuerza de sentido contrario; de donde resultan dos fuerzas que tienden a orientar verticalmente el eje del globo. Para evitar este peligro, es preciso ante todo que esté hacia adelante la sección principal. Después, se asegura la estabilidad completa por medio de un velamen P'G" (fig. 192) colocado en la parte trasera de la envoltura o de

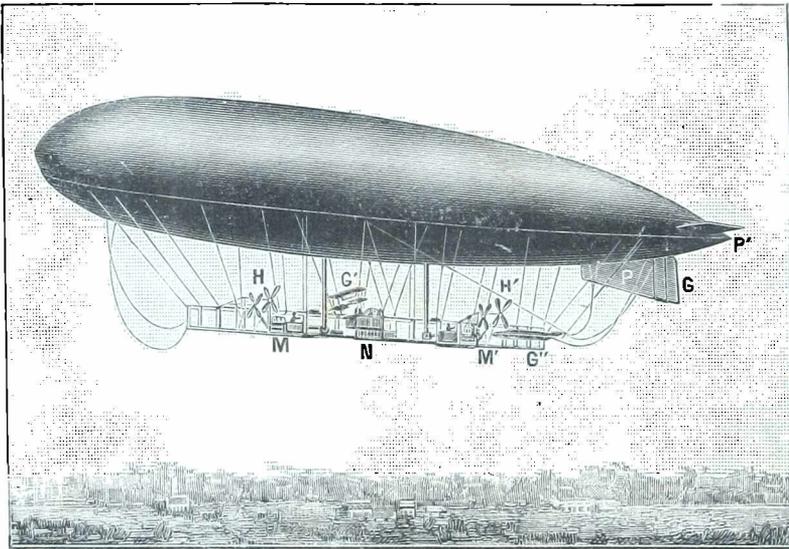


Fig. 192.

la barquilla y formado de planos de tela horizontales. Cuando el globo se inclina en un movimiento de balance, la resistencia que el aire ejerce sobre el velamen vuelve al globo a su orientación normal. Otros planos P, pero verticales, que forman el velamen aseguran la *estabilidad de marcha*, es decir que impiden que el dirigible tome oscilaciones de derecha y de izquierda.

5.º *Estabilidad vertical.* — Un globo siempre tiende a subir o a bajar, porque su fuerza ascensional varía sin cesar por causa de las variaciones de temperatura y de humedad del aire, así como también por las fugas de gas. Para conservar un nivel constante, sin arrojar lastre ni perder gas, se emplean *equilibradores* o *timones de profundidad*. Estos están formados por planos de tela G' móviles al rededor de ejes horizontales. Se puede hacer que giren de tal modo que el aire los empuje sea por debajo, y entonces la resistencia del aire tiende a levantar el globo y aumenta la fuerza ascensional, sea por encima, y entonces la resistencia del aire disminuye la fuerza ascensional*.

* La figura 192 representa el dirigible francés *Capitaine Ferber*, cuyas características principales son: longitud 76 metros, diámetro en la cuaderna maestra 12 m. 36, volumen 6 000 m³. Posee dos globitos de 650 m³; la barquilla de tubo de acero tiene 35 metros de largo, 1 m. 20 de ancho, 2 metros de altura; dos motores de 150 HP, poco más o menos, mueven dos hélices de cuatro aletas de 3 m. 50 de diámetro, que dan 1 000 vueltas por minuto; unos depósitos de esencia de 1 000 litros aseguran el funcionamiento de los motores durante 15 horas.

186. **Globos sin aeronata.** — **Sondas aéreas Renard.** — Con el fin de explorar altas regiones de la atmósfera, se ha procedido a substituir los globos *tripulados* ordinarios por globos *no tripulados*. Esta idea, emitida en 1873 por Claudio Jobert, ha sido estudiada desde el punto de vista práctico por Hermitte y el coronel Renard, que ha dado a los aeróstatos no tripulados el nombre significativo de *sondas aéreas*.

La sonda aérea Renard se compone de un globo de hidrógeno de 6 metros de diámetro, y cuya envoltura, prácticamente impermeable, está reducida al ínfimo peso de 45 gramos el metro cuadrado. El globo lleva consigo los diversos instrumentos propios para las observaciones: barómetro, termómetro, actinómetro, electrómetro, etc. Estos son registradores automáticos del sistema Richard, muy ligeros, y están protegidos contra los choques de descenso por dispositivos especiales llamados *parachoques*. El instrumentario está suspendido como una araña en medio de su tela, por un sistema de muelles de caucho que vañ de la parte superior de la caja que le contiene a una cestita ligera. La red, los registradores y los *parachoques* todo junto no pesan más de 5 kilogramos.

Así formada y llena de hidrógeno, la sonda Renard puede subir a una altitud superior a 20 000 metros.

La envoltura tiene una pequeña abertura, no para detener el globo en su marcha, sino para abreviar la duración de su estancia en las regiones elevadas y determinar luego su descenso regular.

Las sondas han prestado grandes servicios en el estudio de los fenómenos atmosféricos, por ejemplo, para determinar las direcciones de las corrientes aéreas, la temperatura del aire a diversas altitudes, etc. Para muchas observaciones, se los puede reemplazar por cometas (187).

186. **Aparatos de aviación más pesados que el aire.** — **Aeroplanos.** — **Cometas.** — Desde

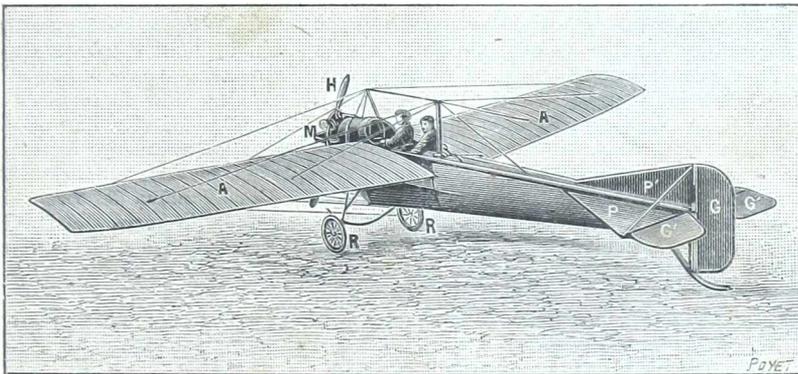


Fig. 193.

hace mucho tiempo, se pensaba dirigir en la atmósfera aparatos más densos que el aire, imitando a los insectos y aves. Los aparatos imaginados son de tres tipos; de *alas batidoras* u *ornitópteros*, *helicópteros* y *aeroplanos*.

Las *alas batidoras* imitan el movimiento de las alas de las aves; pero no han dado resultados favorables.

En los *helicópteros* se ha tratado de sostener el aparato por una ó más hélices de eje vertical, asegurando la propulsión por medio de hélices de eje horizontal. Esta idea, que se ha realizado en juguetes para niños, no ha dado resultado, en grande.

Por el contrario, los aeroplanos han dado, en estos últimos años, una solución casi enteramente satisfactoria del problema de la locomoción aérea.

Aeroplanos. — 1º *Principio.* — Se comprenderá el principio de la construcción de los aeroplanos observando ciertas particularidades del vuelo de las aves. Es frecuente ver un ave, que parte de un punto elevado, descender a tierra con las alas tendidas y casi inmóviles; la trayectoria que ha seguido es en este caso oblicua. Esto obedece a que el aire, hiriendo las alas por debajo, desarrolla una fuerza vertical, dirigida hacia arriba que equilibra el peso. Las grandes aves pueden volar mucho tiempo, elevándose por medio de aletadas, y dejándose caer en seguida oblicuamente, para volverse a elevar, y así sucesivamente. Gracias a este género de vuelo llamado *vuelo cernido*, las aves pueden efectuar grandes distancias sin emplear grande energía. Por el contrario, cuando un ave, parada en el suelo, quiere tomar de pronto el vuelo, necesita hacer un esfuerzo

considerable. Hay algunas que no pueden echar a volar, sino dando una carrera con las alas desplegadas; en este caso la componente vertical de la resistencia del aire es la que las levanta. Luego vamos a ver que los acroplanos se elevan de manera enteramente análoga.

2º *Reseña histórica.* — Los primeros experimentos satisfactorios tuvieron por objeto imitar el vuelo cernido de las aves. Entonces se empleaban aparatos desprovistos de motor, lanzándolos de un punto elevado, los cuales descendían siguiendo una trayectoria oblicua. Componíanse de una o varias superficies de tela, planas o un poco curvas, sostenidas por una armazón ligera, y algo inclinadas sobre el horizonte, para presentar su cara inferior a la resistencia del aire. El profesor alemán Otto Lilienthal fué el primero que empleó estos aparatos. Después de su muerte, acaecida en una caída, continuaron sus experimentos, en América, un francés llamado O. Chanute, y después los hermanos Wright. A la sazón hacían también algunos experimentos en Francia el capitán Ferber y M. E. Archdeacon. Todos estos experimentos suministraron los datos necesarios para realizar el *vuelo mecánico*, que se obtuvo aplicando al aeroplano un motor que pone en movimiento una hélice de ojo horizontal. Pero no se obtuvo ningún resultado hasta dar con motores bastante ligeros. Sólo a fines de 1903 lograron los hermanos Wright realizar realmente el vuelo mecánico. Por entonces, muchos aviadores construían, en Francia, aparatos capaces de efectuar vuelos cada vez más largos; entre los más conocidos debemos citar a Santos-Dumont, Blériot, Esnault-Pelterie y Voisin.

3º *Clasificación.* — Los acroplanos se dividen en *monoplanos* (fig. 193) y *biplanos* (fig. 194) según que las alas A, que constituyen la superficie sostenedora, están formadas de una sola superficie o de dos sobrepuestas. Los monoplanos son más ligeros y rápidos, pero los biplanos son más fáciles de construir, porque se les da mejor la solidez necesaria, reuniendo las dos superficies por medio de travesaños y de obenques de alambre de acero.

4º *Propulsión de los acroplanos.* — *Condiciones mecánicas del vuelo.* — Todo aeroplano está provisto de un motor de explosión M, de una potencia de 50 a 100 caballos, que mueve generalmente una hélice H de eje horizontal: el aparato descansa, en el suelo, en un bastidor con ruedas neumáticas R* y patines para facilitar la toma de tierra. Para lanzarlo se pone el motor en movimiento; la fuerza propulsiva que produce la hélice, arrastra el aparato, que rueda por el suelo; la velocidad creciente y la resistencia del aire, que experimentan las alas, levanta el aeroplano y comienza a volar. Sea AB (fig. 79, II) un elemento de una superficie sostenedora. La resistencia del aire tiene una componente vertical V, dirigida hacia arriba, y una componente horizontal R, dirigida en sentido inverso del movimiento. Luego el aeroplano se sostendrá a una altura constante si *el conjunto de las fuerzas tales como V, tiene una resultante igual al peso total del aparato.*

Además, las fuerzas horizontales R tienen una resultante en sentido inverso del movimiento; llámase la *resistencia al avance*. Para que el aeroplano arranque horizontalmente, con una velocidad constante, es preciso que el *esfuerzo de propulsión de la hélice sea igual a la resistencia al avance.*

A igualdad de resistencia F, la componente V es tanto mayor y la componente R tanto menor, cuanto más pequeño es el ángulo de inclinación sobre el horizonte, o *ángulo de ataque*. Pero no se puede disminuir esta inclinación más allá de cierto límite, porque la fuerza F, así como V, disminuirían demasiado. Luego se debe dar al ángulo de ataque un valor *óptimo*, que es poco más o menos 5º durante la marcha horizontal. En estas condiciones la resistencia del aire es relativamente débil, pero casi vertical, y la resistencia al avance queda muy reducida.

La experiencia ha demostrado, además, que a igualdad de superficie, de velocidad y de inclinación, la fuerza sostenedora es tanto más grande cuanto más prolongada sea la superficie en la dirección perpendicular al movimiento. Por esta razón se da a las alas de los acroplanos grande envergadura, con una anchura relativamente pequeña. Por último, es ventajoso que las alas sean superficies ligeramente curvas, con su concavidad hacia abajo.

5º *Estabilización.* — Si el aire es fuerte, entonces ejerce sin cesar sobre las superficies del aeroplano fuerzas variables que tienden a comunicarle movimientos de balanceo y arfada, así como de oscilación en un plano horizontal. Los movimientos de balanceo se corrigen con el *alabeo de las alas*, que consiste en doblar ligeramente el borde posterior de las alas con la maniobra de una palanca y de una transmisión a propósito. Si el

* Los *hidro-aeroplanos* o *hidroplanos*, destinados para volar sobre las aguas de los mares y ríos, tienen flotadores en vez de ruedas.

aeroplano se inclina a la derecha, se maniobra el ala derecha para darle más curvatura, disminuyendo a la vez la del ala izquierda; pues como la resistencia del aire aumenta a la derecha, este costado se levanta.

La atenuación de la arfada se obtiene en parte automáticamente por efecto de la cola del aparato, que posee superficies horizontales. Si el aparato se empina, que tal es su tendencia habitual, la resistencia del aire bate por debajo la cola y la levanta. El timón de profundidad G' (fig. 193, 194) de que vamos a hablar, contribuye también a corregir la arfada. Los movimientos de oscilación horizontales se corrigen por medio de las superficies verticales de la cola, que de este modo aseguran la *estabilidad de marcha*.

6ª Evolución. — Para volver a la derecha o a la izquierda, el aeroplano tiene un timón de dirección G (fig. 193, 194) que se maniobra como el de un barco. Pero en una virada, el aeroplano debe inclinarse, como un ciclista, para vencer el efecto de la fuerza

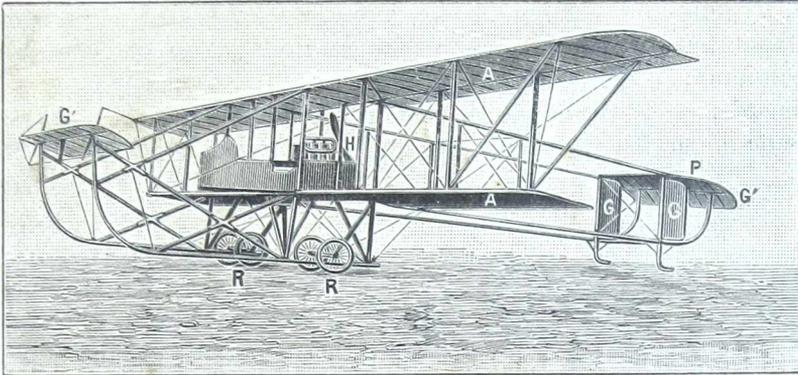


Fig. 194.

centrífuga. Esta inclinación se obtiene por el alabeo de las alas. Para subir o bajar, el aeroplano posee un timón de profundidad de eje horizontal, sea por delante, sea por detrás, como si dijéramos, bien en la proa, bien en la popa. En el primer caso, si se aumenta su ángulo de ataque, la resistencia del aire levanta más la proa del aeroplano, el cual sube; pero baja si se disminuye dicho ángulo del timón. Si éste está en la popa, la maniobra es inversa.

Ciervos voladores. — Los aeroplanos han podido aproximarse a los ciervos voladores. Estos aparatos se elevan y mantienen en el aire por la acción del viento sobre una o varias superficies de tela inclinadas hacia el horizonte.

Los antiguos ciervos voladores, formados únicamente por una tela tendida sobre un cuadro, no tenían más que una estabilidad muy mediana. Se han perfeccionado mucho, dándoles forma *celular*. Ahora son una especie de cajas abiertas, formadas por paredes de tela y cuya armazón es de bambú o aluminio. Un ciervo volador puede comprender varias de estas células. También puede ir acompañado de alas convenientemente dispuestas. Si el viento es demasiado débil para elevar el aparato, se le lanza colocándolo de plano en el suelo, y arrastrándolo con un automóvil. De este modo se llega a altitudes que pueden exceder de 5000 metros.

Perfeccionados de este modo, los ciervos voladores se han convertido en preciosos aparatos de exploración de la atmósfera elevada. Se les puede confiar aparatos registradores. Respecto a esto, citaremos los experimentos de Teisserenc de Bort.

También se emplean los ciervos voladores para llevar antenas de telegrafía sin hilos a los puestos militares.

CAPÍTULO IV

BOMBAS PARA GASES Y PARA LÍQUIDOS

BOMBAS PARA VACÍO

188. Principio de las bombas para vacío o máquinas neumáticas. — Estos aparatos son bombas destinadas a enrarecer un gas contenido en un recipiente.

Principio. — El principio de muchas bombas para vacío es el de la bomba de mano. En un cilindro C (fig. 195), llamado cuerpo de bomba,

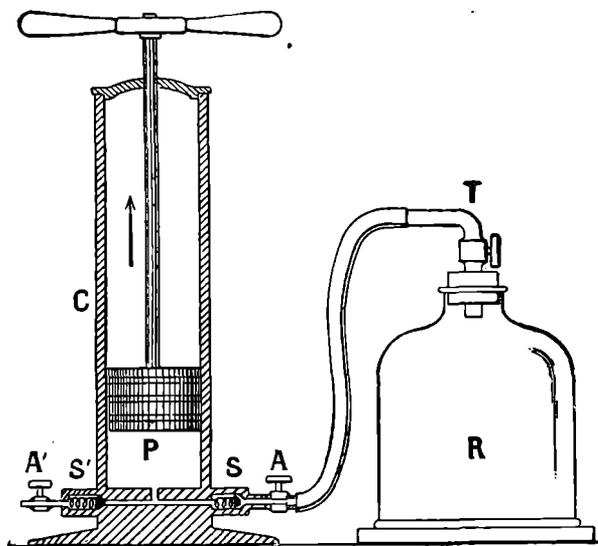


Fig. 195.

se mueve un pistón P. El cilindro puede comunicar con el exterior por dos orificios AA', cerrados por válvulas cónicas apoyadas ligeramente sobre su asiento por muelles. Una, S, se abre de fuera a dentro, la otra, S', se abre de dentro afuera. Se pone A' en comunicación con la atmósfera y A con el recipiente de gas donde supondremos la presión inicial igual a la presión atmosférica.

Estando el émbolo

abajo de su recorrido, levantémoslo; el vacío se hace debajo de él; la válvula S se abre por efecto de la presión del gas de R, que se reparte entre el recipiente y el cuerpo de bomba; luego en el recipiente disminuye la cantidad de gas, al mismo tiempo que su presión. Bajemos el émbolo, la válvula S se cierra; el gas contenido en el cuerpo de bomba queda pues, encerrado y es comprimido progresivamente hasta exceder la presión atmosférica: entonces se levanta la válvula S' y el gas sale afuera. Cuando se repite la maniobra, la cantidad de gas, así como su presión, irán disminuyendo en el recipiente, e igualmente disminuirá la masa de gas que extrae el émbolo. Desde luego se concibe que con semejante bomba, aunque esté bien construída, no se pueda sacar todo el gas del recipiente; pero que, en cambio, se pueda reducir su presión tanto como se quiera. Sin embargo, en la práctica, las fugas inevitables que

ocurren en las válvulas y los bordes del émbolo, así como la influencia del espacio perjudicial, limitan más o menos esta presión.

Espacio perjudicial. — La válvula *S'* no deja salir el gas sino cuando la presión en el cuerpo de bomba llega a ser superior a la de la atmósfera. Si el espacio comprendido entre la válvula y la base del émbolo pudiera llegar a ser absolutamente nulo, se podría realizar esta condición, cualquiera que fuese la pequeñez de la presión inicial.

Pero queda forzosamente un espacio debajo del émbolo, llamado *espacio perjudicial*. Entonces ocurrirá que para una presión inicial muy pequeña, cuando el émbolo esté abajo de su recorrido, la presión en el *espacio perjudicial* no llegará a ser superior a la presión atmosférica y que, por consiguiente, ya no se podrá evacuar ninguna cantidad de gas. Desde ese momento, es evidente que no se podrá retirar más aire del recipiente.

Esfuerzos necesarios para la maniobra del émbolo. — Cuando el émbolo sube, la presión atmosférica ejerce sobre su cara superior una fuerza vertical que se opone al movimiento; sobre su cara inferior, la presión del gas, que es menor que la de la atmósfera, produce el efecto contrario; luego es preciso vencer la diferencia de esas dos fuerzas. Por ejemplo, sobre una superficie de émbolo de 50 centímetros cuadrados, la presión atmosférica ejerce una fuerza de unos 50 kilogramos. Si, en ese momento, se reduce la presión del recipiente a la décima parte de la presión atmosférica, la cara inferior sólo recibirá una fuerza de 5 kilogramos. Luego hay que hacer un esfuerzo de unos 45 kilogramos.

Cuando baja el émbolo, esta fuerza empieza a producir por sí misma el movimiento; pero disminuye a medida que aumenta la presión interior y acaba por ser nula en el momento en que la presión inferior es igual a la presión atmosférica, y así permanece cuando se ha abierto la válvula *S'*.

Disposiciones empleadas en los recipientes en que se hace el vacío. — La mayoría de las veces, el vaso en que se quiere efectuar el vacío se halla unido a la bomba por un tubo de caucho de paredes gruesas (a fin de que no se rompa por el efecto de la presión atmosférica).

Pero, en muchos casos, se desea colocar estos aparatos en un espacio vacío. Entonces, se emplea una campana de vidrio, de bordes bien rectos (fig. 195), que descansa en un plano de vidrio llamado *platina*. Para impedir que entre el menor aire se untan con sebo los bordes de la campana. En las antiguas máquinas neumáticas, la platina tenía una abertura por la cual pasaba un tubo puesto en comunicación con la bomba (fig. 162). Pero es más cómodo emplear una campana con tubo de destilación que descansa en una platina sin abertura. Por dicho tubo *T*, que atraviesa a un tapón de caucho, la campana queda en comunicación con la bomba.

189. *Bombas de vacío industriales.* — *Bomba de vacío, de corredera de Burckhardt.* — En la industria se emplean, para hacer un vacío imperfecto, bombas de émbolo que funcionan según un principio análogo al de la bomba de mano, pero son movidas por un motor mecánico, por ejemplo, una máquina de vapor. En la bomba de Burckhardt, se establecen las comunicaciones, no por válvulas, sino por el juego de una corredera análoga a la de una máquina de vapor (347), dispuesta de modo que disminuye el efecto del espacio perjudicial. La pared del cilindro *C* (fig. 196) tiene tres conductos, que van a parar a la cara exterior: *a* y *b* comunican con los extremos del cilindro, *c* comunica con el recipiente de gas por un tubo perpendicular al plano de la figura. Un órgano móvil, la corredera *T*, que tiene una cavidad *d* y conductos *t*, *t'*, *t''* puede deslizarse por la pared del cilindro, y está cubierta con una válvula *S* de muelle; está colocada en una

caja B, en comunicación con la atmósfera por el tubo A. El vástago del émbolo atraviesa el fondo del cilindro por una juntura estanco. Estando la corredera en la posición de la figura, yendo el émbolo en el sentido de la flecha, aspira el gas del recipiente por el conducto *b*, la cavidad *d* y el conducto *c*; al mismo tiempo el gas que estaba a la izquierda del émbolo es impelido por *t* a la caja B y a la atmósfera por A. Cuando el pistón está al fin de su recorrido, la corredera es empujada automáticamente hacia la izquierda, estableciendo las comunicaciones inversas y el émbolo, yendo hacia la derecha, aspira entonces en la izquierda y empuja a la atmósfera el gas situado a la derecha. Cuando está en el extremo derecho de su recorrido, la corredera vuelve a su primera posición y así sucesivamente.

El efecto del conducto *t''* es el siguiente: cuando el émbolo llega a la izquierda, quedaba gas en el espacio perjudicial; pero, durante el movimiento de la corredera hacia la izquierda, *t''* establece un momento la comunicación entre este espacio perjudicial y el compartimiento de la derecha del cilindro, donde la presión es muy reducida; de aquí resulta una evacuación más completa del gas a cada juego del émbolo.

190. Bomba neumática E. Carré. — En esta máquina (fig. 197) el émbolo tiene una abertura cerrada por una válvula Z, reemplazando la válvula S' de la bomba de mano. Su vástago es hueco y en su interior se mueve, con frotamiento duro, un vástago terminado por una válvula S, que puede cerrar el orificio de comunicación con el recipiente unido a K. Además, el cilindro está herméticamente cerrado en su

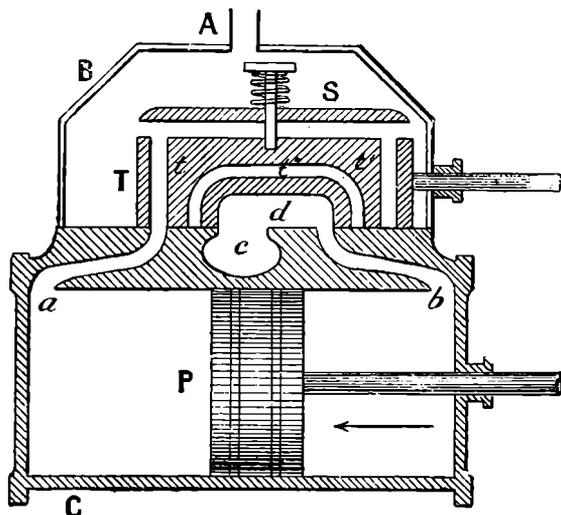


Fig. 196.

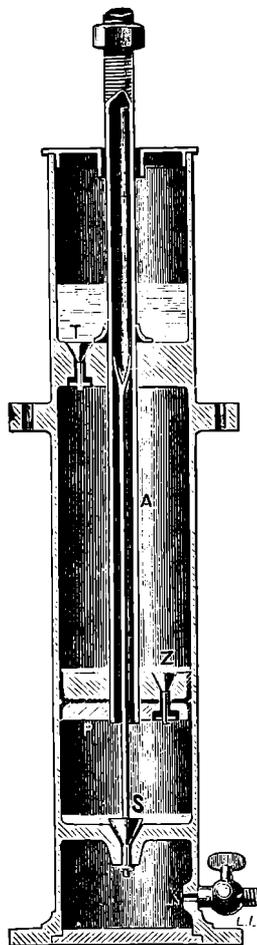


Fig. 197.

parte superior por una pared que cierra la válvula T. Cuando sube el émbolo, sube S y la comunicación queda establecida entre el cilindro y el recipiente: el movimiento de S está limitado por una clavija inferior. Cuando baja el émbolo, se cierra S, el aire comprimido por el émbolo levanta Z y pasa al compartimiento superior del cilindro. Como se habla efectuado el vacío encima del émbolo a consecuencia del cierre de la válvula T, queda disminuida la influencia del espacio perjudicial, porque la válvula Z se abre más pronto que si hubiera presión atmosférica en A. También se disminuye el efecto del espacio perjudicial con una capa de aceite lubricante encima del fondo del cilindro y del émbolo. Cuando sube el émbolo, se comprime el aire que había pasado a A, levanta la válvula T y se escapa.

191. Bomba de vacío de juntas de aceite de Gerick. — Descripción. — El émbolo P (fig. 198) está provisto de una válvula S y apoya contra

las paredes del cilindro por una piel emplomada CC. Está coronado por una capa de aceite. El vástago TT del émbolo atraviesa la pared superior del cilindro, que está provista de una especie de válvula formada por una piel emplomada C'C' apretada contra una armadura metálica que se prolonga en un añadido D. Sobre la válvula superior hay una capa de aceite H'. El cilindro comunica con el tubo de aspiración A por otros dos tubos, H y K, que desembocan en una caja B, destinada a impedir que el aceite sea empujado, por los movimientos del émbolo, hasta el tubo A.

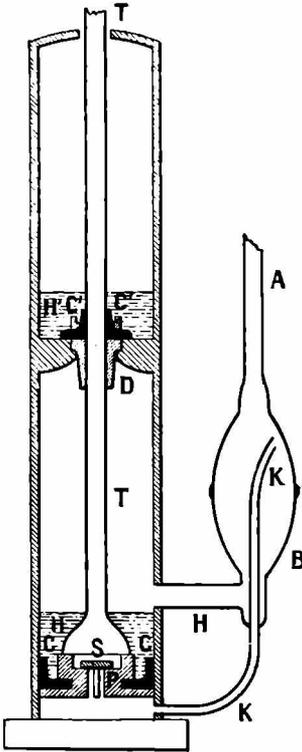


Fig. 198.

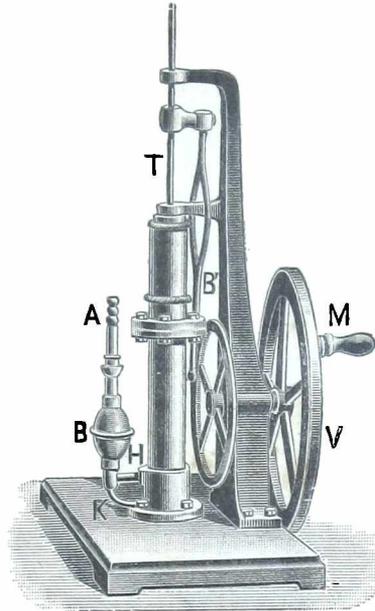


Fig. 199.

Funcionamiento. — Supongamos que el émbolo se halla en los más alto de su carrera. Chocando contra el añadido D, levanta la válvula superior y las dos masas de aceite no forman más que una sola. Entre el émbolo y la pared, no puede existir ningún espacio perjudicial. Cuando el émbolo baja, mantiene levantada la válvula superior. Durante la primera parte de su carrera, lo cual deja que una porción de aceite siga su movimiento. En cuanto se cierra la válvula D, prodúcese el vacío encima del émbolo. Si el vacío no es aún muy perfecto en el compartimiento inferior del cilindro, la válvula S no tarda en levantarse y el gas inferior pasa encima del émbolo para ser expelido por D al subir otra vez el émbolo. Pero, así que el vacío llega a 3 o 4 milímetros de mercurio, la válvula S deja de levantarse, y el tubo K, que, al principio, servía para la aspiración, se vuelve inútil. En cuanto, durante el descenso del émbolo, la capa de aceite pasa del orificio del tubo H, parte del gas contenido en el recipiente por vaciar penetra en el cilindro, en donde reina el vacío. A la siguiente ascensión del émbolo, este gas es evacuado por D. Se ve, pues, que, por muy débil que sea ya la presión en el recipiente, éste cederá siempre parte de su aire al cilindro a cada movimiento del émbolo. Por consiguiente, podrá conseguirse una presión sumamente baja.

La maniobra del émbolo se ejecuta sea por medio de un balancín, sea mediante un volante V y una biela B' (fig. 199).

También se construyen bombas de articulaciones de aceite con dos cilindros que permiten elevar más el vacío, en las que la evacuación del

gas del primer cilindro se efectúa en el tubo de aspiración del segundo. Las bombas industriales son movidas por motores mecánicos.

192. **Máquinas neumáticas de mercurio.** — El principio de las

máquinas de mercurio consiste en repetir cómoda e indefinidamente el experimento de Torricelli con un recipiente o campana de gas. En estas máquinas desaparece todo espacio perjudicial con el empleo de una columna de mercurio a guisa de émbolo.

Máquina de Alvergniat. —

Este aparato se compone de dos depósitos A y B (fig. 200) que se comunican por un tubo barométrico y otro de caucho I. Para poner en movimiento el sistema se da vueltas al manubrio de un volante C para que suba o baje el depósito B. Encima del depósito A, hay una llave de tres conductos D, de donde arranca un tubo que sirve para la aspiración, y en la izquierda hay otra llave simple E, que pone en comunicación un depósito de mercurio R con la atmósfera. El tubo de aspiración va primero a un depósito H, lleno en parte de ácido sulfúrico destinado a secar los gases que llegan al aparato. Este depósito H tiene un barómetro de mercurio M. El tubo G sirve para poner en comunicación al depósito con el recipiente.

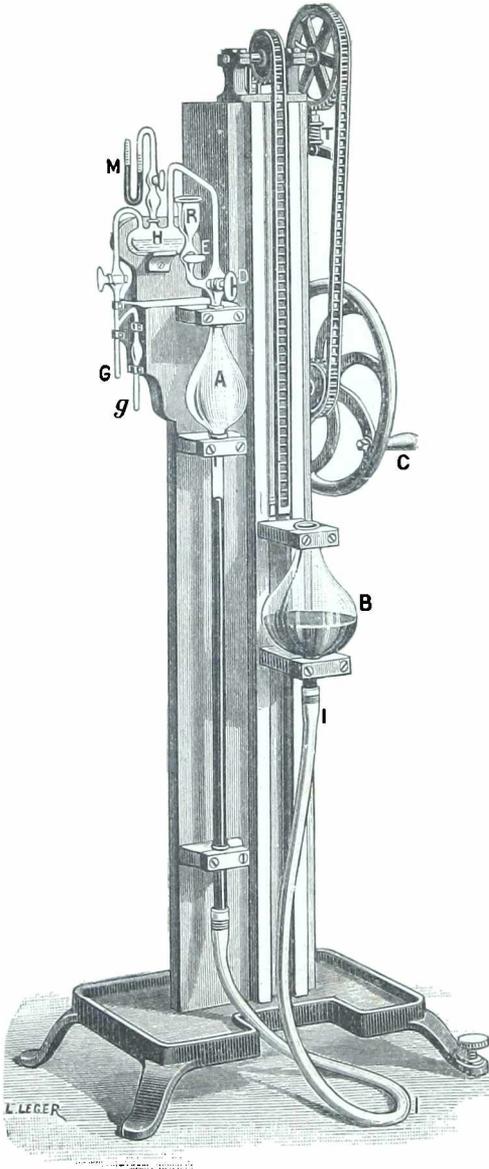


Fig. 200.

Funcionamiento. — Estando el depósito B en lo alto de su recorrido, la llave E abierta y la llave D poniendo en comunicación A y E, se llena de mercurio el depósito A. Si entonces se cierra la llave D y se baja el depósito B, el mercurio baja al depósito A

y el tubo adyacente hasta que la diferencia de nivel en ambas ramas sea igual a la altura barométrica, y en el depósito A se hace el vacío. Entonces se da vuelta a la llave D, como lo indica la figura, y el gas del recipiente donde se hace el vacío llega a A. Se vuelve a poner la llave en la posición inicial y se sube otra vez el depósito B; el mer-

curio desaloja por las llaves D y E el gas que había entrado en la cámara A. Esta operación se repite cuantas veces sea menester.

OBSERVACIÓN. — Con esta máquina se puede llevar el vacío hasta $\frac{1}{10}$ de milímetro, con tal de que el mercurio esté bien seco. Pero sólo se emplea para hacer el vacío en espacios pequeños. Cuando se trata de vasos grandes, se empieza por hacer el vacío con aproximación de 1 centímetro con una máquina ordinaria.

Máquinas sin llaves. — Actualmente, se construyen máquinas de mercurio desprovistas en absoluto de llaves y que funcionan automáticamente por medio de un simple balanceo vertical del recipiente.

El tubo E de evacuación del gas parte del vértice de la ampolla A (fig. 201), se encorva, y va a sumergirse en una cubeta de mercurio (no representada en la figura), instalada en la plataforma que soporta a la máquina. El tubo de aspiración G llega a una protuberancia K, en donde hay una especie de válvula realizada por un flotador de vidrio F, dispuesto como lo indica la figura. Su parte superior puede, al levantarse, ir a cerrar el extremo del tubo G. El juego del aparato es el siguiente :

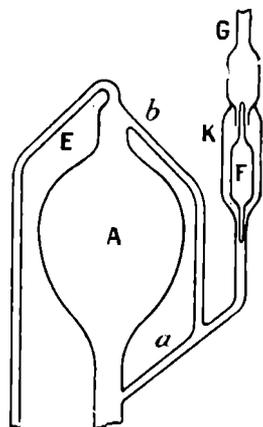


Fig. 201.

Al levantarse el recipiente B, el tubo E evacua el aire de A a través del mercurio de la cubeta en que desemboca. Penetrando, el mercurio, en K, eleva el flotador F e intercepta toda comunicación entre A y el recipiente por vaciar que está unido al tubo G. Cuando se baja B, tan pronto como el mercurio desciende a K, el flotador baja y,

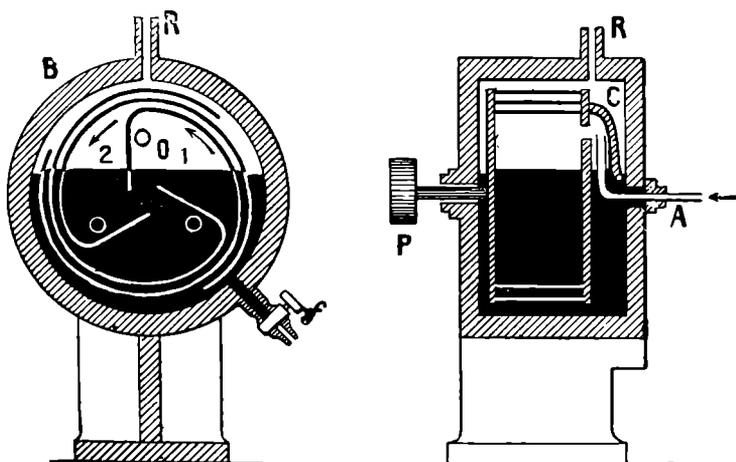


Fig. 202.

el nivel del mercurio desciende por bajo del orificio a del tubo ab, el recipiente por vaciar se encuentra en comunicación con A. Se ve que se obtiene automáticamente el mismo resultado que con las llaves de la máquina anterior.

193. **Bombas de vacío rotatorias.** — También se construyen bombas de vacío llamadas rotatorias, que funcionan con movimiento rotatorio continuo.

Una de las más perfectas es la de Gaede, de mercurio. En esta bomba hay una caja B (fig. 202), que contiene mercurio hasta un nivel algo superior al de su eje. En esta caja gira un tambor de porcelana, dividido en tres compartimientos. Cada uno de estos tiene un orificio, tal como O, que, cuando se encuentra arriba, comunica con el recipiente de gas por la campana C y el tubo A. Además, los compartimientos pueden comunicar, por los intervalos de los tabiques, con el interior de la caja y con la atmósfera por el tubo R.

Cuando gira el tambor en el sentido de las flechas, se ve que uno de los compartimientos 1 aumenta de volumen y que la comunicación con el recipiente está abierta precisamente en ese momento; luego hay aspiración de gas en ese compartimiento. Mientras tanto el compartimiento 2 disminuye de volumen y el gas que contiene sale afuera. Cada compartimiento desempeña alternativamente el papel de 1 y de 2 y la aspiración es continua. Con esta bomba se obtiene rápidamente una presión de un milésimo de milímetro de mercurio.

194. **Trompa de agua.** — Las *trompas de agua* se fundan en el principio que sigue :

Consideremos una corriente líquida que circula por un añadido discontinuo, compuesto de dos troncos de cono A y C (fig. 203). Se ve que el aire exterior se aspira en D y luego, a causa de su adherencia, es expelido con la corriente líquida.

La figura 203 representa una pequeña trompa

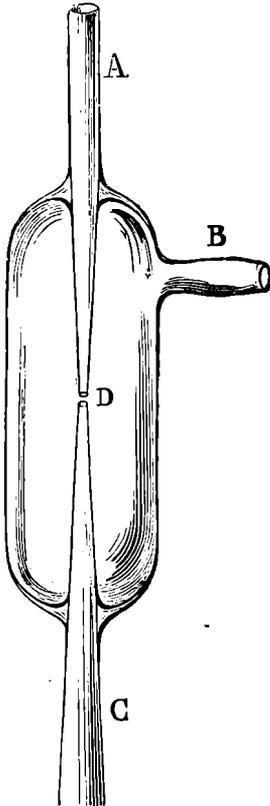


Fig. 203.

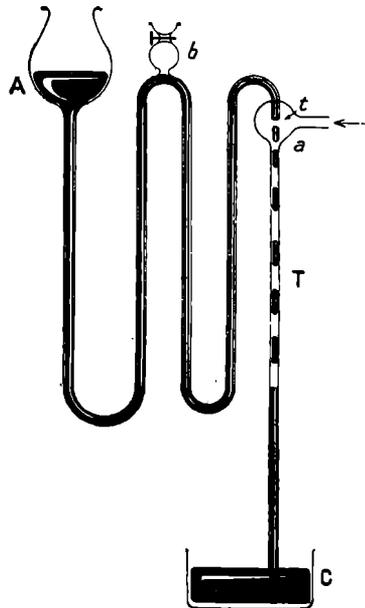


Fig. 204.

de agua de Alvergniat. El tubo A está directamente adaptado a un grifo de fuente; la llamada del aire se produce desde el exterior por el tubo B. Si se adapta éste a un recipiente lleno de gas, se produce en él vacío hasta una presión igual, a lo sumo, a la presión máxima que posee el

vapor de agua a la temperatura ambiente (284). Por lo tanto, el vacío es imperfecto. No obstante, el aparato es muy cómodo en gran número de casos.

195. **Trompas de mercurio.** — Las *trompas de mercurio* o *trompas de Sprengel* se emplean también para hacer el vacío. He aquí su principio.

El mercurio que procede de un vaso A (fig. 204) cae gota a gota, por el tubo *t*, a una ampolla *a* puesta en comunicación con el recipiente en que se quiere producir el vacío. Las gotas que caen al tubo T aprisionan entre sí el aire que emana del recipiente, el cual, de este modo, se vacía poco a poco; el aire aspirado sale a través del mercurio de la cubeta C. Siendo muy lenta la acción de la trompa, se verifican a la vez varias caídas de mercurio. Para eliminar las burbujas de aire que pudiera arrastrar el mercurio antes de llegar a *t*, se le conduce antes por un tubo encorvado, debajo de una ampolla *b* que se puede abrir hacia la atmósfera de cuando en cuando.

Bomba-trompa de M. Chabaud. — El aparato (fig. 205) es completamente de vidrio y se compone de una bomba de mercurio ordinaria unida a una trompa de seis caídas de mercurio. La *bomba* comprende el mecanismo M, el recipiente móvil C, los dos tubos A y B unidos por un tubo de caucho y por fin la ampolla *l* con el tubo de aspiración D por otra parte. La *trompa* comprende el recipiente móvil C el tubo lateral *ab*, así como la ampolla *c*, el tubo descendente *cd*, el doble tubo ascendente *dt* y *dt'*, y en fin las dos trompas de triple caída *t* y *t'* que van a terminar en la cubeta H.

Manipulación. — El recipiente donde se quiere hacer el vacío es puesto en comunicación con el aparato por medio del tubo lateral F. Empiézase el vacío con la bomba propiamente dicha y después se lo acaba valiéndose de la trompa.

Para hacer funcionar sola la bomba, se da vuelta a la llave de tres conductos R de

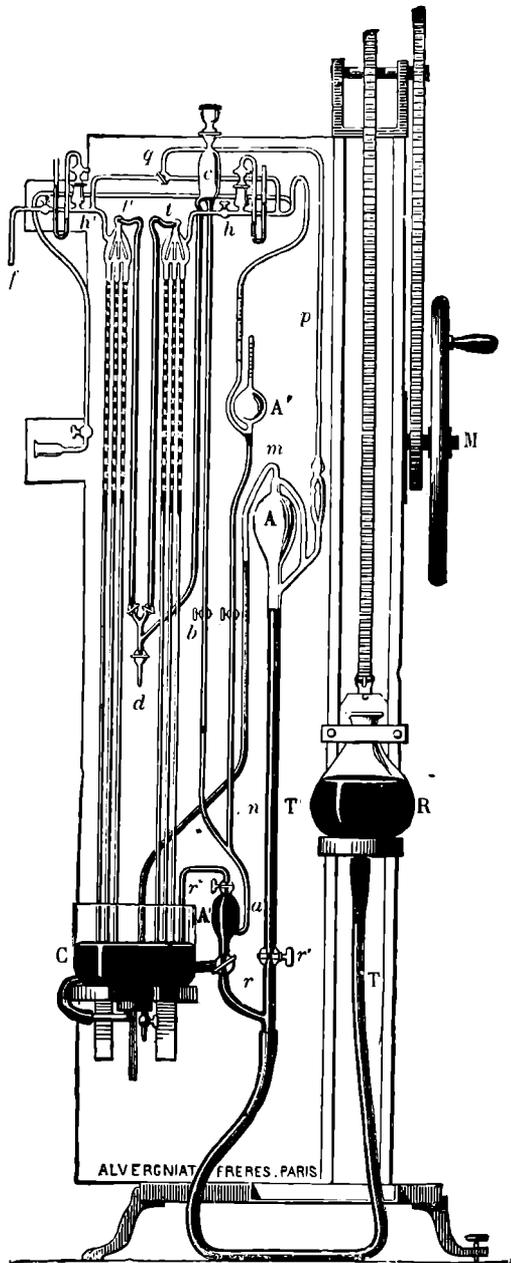


Fig. 205.

modo que se intercepte toda comunicación entre el tubo B, por una parto, y la cubeta, así como el tubo *ab*, por otra.

Cuando se quiere terminar el vacío, hay que dar primeramente vuelta a la llave R, de manera que intercepte la comunicación entre el recipiente y el tubo B, estableciéndola por el contrario entre el recipiente y la trompa propiamente dicha, mediante la ampolla R y el tubo *ab*. — Hecho esto, se levanta el recipiente móvil hasta una altura suficiente: el mercurio sube lentamente hasta el vértice *tl'* de las trompas, desde allí, cae gota a gota por las seis ramas descendentes.

Disposición de Verneuil. — Uno de los inconvenientes prácticos de la trompa de mercurio es la dificultad de hacer que vuelva a subir el mercurio que ha caído, para poder hacer de nuevo la operación. M. Verneuil ha imaginado la manera de hacer que suba automáticamente este mercurio por medio de una trompa de agua ordinaria, la cual aspira al mismo tiempo el mercurio y las pompas de aire, cuya tensión ayuda al mercurio a elevarse.

El aparato de Verneuil (fig. 206) consiste en un tubo de vidrio B, de unos 80 centímetros, que remata en una ampolla, la cual comunica por arriba con la trompa de agua y por el lado con un tubo M de pequeño diámetro que desciende a lo largo de la armazón y llega en punta biselada hasta la cubeta de mercurio inferior C a pocos milímetros más abajo del tubo.

Estando el aparato dispuesto de este modo, si el mercurio que ha pasado por las caídas y cae en la cubeta inferior, llega hasta el extremo del tubo M, la trompa aspirará una gotita que será empujada por una pompa de aire que pasa por el agujero inferior. El mismo fenómeno se repetirá cuantas veces esté en contacto el extremo del tubo con el mercurio de la cubeta.

196. Producción del vacío por medio del carbón vegetal sometido a la temperatura del aire líquido. — El carbón vegetal posee la propiedad de absorber los gases, en tanto mayor grado cuanto más baja es su temperatura. Dewar ha demostrado que si se uno un recipiente lleno de aire a un tubo que contenga carbón de leña al introducir el tubo en el aire líquido (310), el carbón absorbe el aire del recipiente y se produce un vacío semejante al que dan las trompas de mercurio. Claude ha combinado aparatos prácticos, aplicando este fenómeno a la extracción del aire de las lámparas de incandescencia, a los tubos de Crookes, etc. Arsonval y Bordas

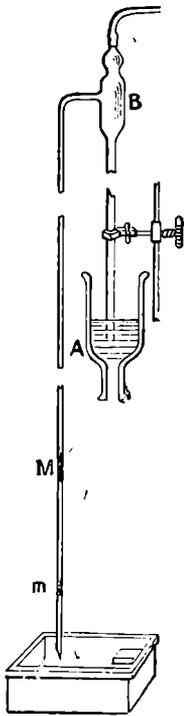


Fig. 206.

han empleado el vacío casi perfecto que así se produce en el análisis de sustancias alimenticias, para evaporar en seco, y en muy poco tiempo, vinos y licores, y también, para desecar en algunos minutos los azúcares, sueros, harinas, etc.

197. Medida de la presión residuo en un recipiente en que se ha enrarecido el aire. — **Barómetro truncado.** — Aparato de Mac-Leod. — Para medir la presión residuo del aire en un recipiente y seguir el avance del enrarecimiento, se usan dos especies de aparatos, según la mayor o menor perfección del vacío. En caso que la presión residuo no resulte inferior a un milímetro, se emplea un barómetro do sifón truncado, es decir, cuya rama cerrada tiene una longitud mucho menor que la altura barométrica. Se halla enteramente llena de mercurio cuando la presión en el recipiente no es suficientemente débil. A este barómetro se llama impropriadamente *manómetro*. Se lo ve en M, en la figura 200. La presión queda medida por la diferencia de nivel del mercurio en las dos ramas.

Pero cuando la presión llega hasta una fracción de milímetro de mercurio, el barómetro ya no da ninguna indicación. Entonces, se emplea el aparato de Mac-Leod. Es un pequeño recipiente *h* (fig. 205), terminado por un tubo cerrado en *k*, graduado, a partir de su vértice, en partes de igual volumen. La capacidad de una división vale, por ejemplo, la *N*ésima parte de la capacidad total hasta *m*. La bola *h* comunica, por una parte con un depósito de mercurio que puede elevarse por cima del aparato (en la figura 205 es el recipiente C de la trompa), y, por otra parte, mediante el tubo *l*, con el recipiente en que se ha efectuado el vacío. Cuando se quiere medir la presión residuo, levántase el depósito. El mercurio llega a *m* y aísla el gas que hay en el aparato. Luego, sube al tubo *l*, al mismo tiempo que a *hk*. Pero el gas se comprime en el aparato, y, cuando el mercurio penetra en *k*, se halla a nivel más elevado en *l*. Una graduación permite medir la diferencia de nivel *h* y *k*; al mismo tiempo, se lee la división *n* de *k*. Sea *x* la presión que se quiere medir. Como el volumen del

gas se reduce a la fracción $\frac{u}{N}$ de su valor primitivo v , tendremos, según la ley de Mariotte :

$$vr = h \frac{vr}{N}, \quad \text{de donde} \quad v = h \frac{u}{N}.$$

APARATOS PARA LA COMPRESIÓN DE LOS GASES

198. Bombas de compresión. — I. Bomba de mano. — La bomba de mano (fig. 207), que sirve para enrarecer los gases, puede servir también para comprimirlos. Para comprimir el aire en un recipiente, basta, en efecto, poner en comunicación el tubo A' con el recipiente y dejar A abierto a la atmósfera. Si se quiere comprimir un gas distinto del aire, se comunica A con un recipiente que contenga este gas. Cuando sube el pistón, se abre la válvula S y el gas es aspirado por A; cuando baja el émbolo, S se cierra, S' se abre y el gas es impelido al recipiente.

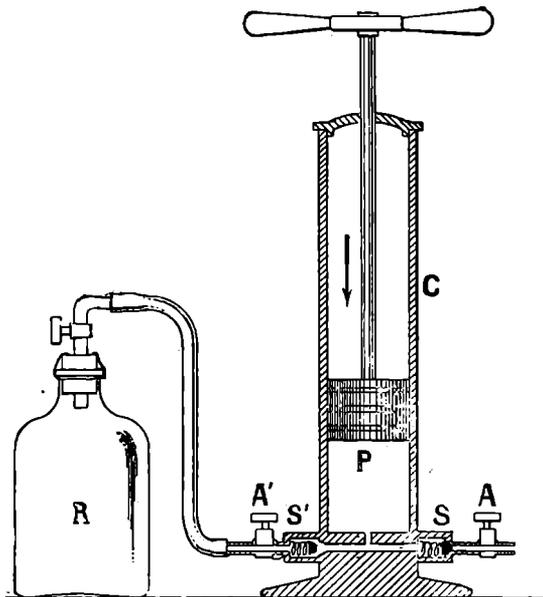


Fig. 207.

Límite de compresión. —
Espacio perjudicial. — La válvula S' solo puede dejar paso al gas cuando la presión del cuerpo de bomba es superior a la que se ejerce

en el recipiente. Si no hubiera ningún *espacio perjudicial*, esto se produciría forzosamente cuando el émbolo estuviera bastante bajo. Pero, por causa de un espacio perjudicial inevitable, no se puede exceder a la presión que toma el gas contenido en el cuerpo de bomba, cuando se halla comprimido en dicho espacio perjudicial.

II. Compresores industriales. — Las bombas de compresión industriales, o compresores, alcanzan presiones elevadas, gracias a un dispositivo, llamado *en cascada*, ideado por Regnault. Una primera bomba P aspira el gas y le somete a una primera compresión, en seguida el gas pasa a una segunda bomba P' y lo comprime más. La figura 208 representa dos bombas acopladas, y cada una es de *doble efecto*. Cuando los émbolos funcionan en el sentido de las flechas, la primera bomba aspira el gas por la válvula A₁ y lo impele por S₁ a la segunda, que lo aspira en A₂ y lo rechaza en S₂. Cuando es inverso el movimiento de los émbolos, la aspiración se efectúa en la primera bomba en A'₁, y en la segunda en A'₂, mientras que es repelido en S'₁ y en S'₂. En estas diversas

compresiones el gas se calienta (309-368); entonces se le enfría sea echando agua en los cilindros, sea rodeando los tubos de comunicación con una circulación de agua fría.

Para alcanzar mayor presión todavía, se emplean tres bombas suce-

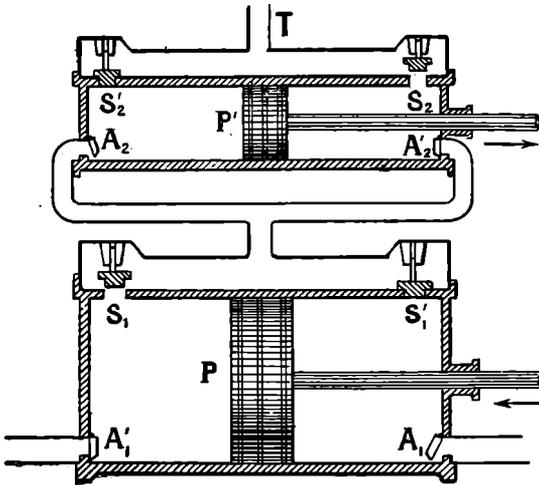


Fig. 208.

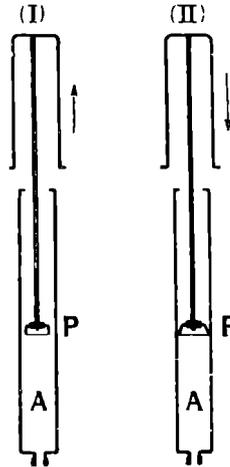


Fig. 209.

sivas. Tal es el compresor de Mekarski, en el cual una primera bomba comprime el aire atmosférico a la presión de 4,25 kg. por cm^2 ; la segunda a la presión de 25 kg. y la tercera a 80 kg.

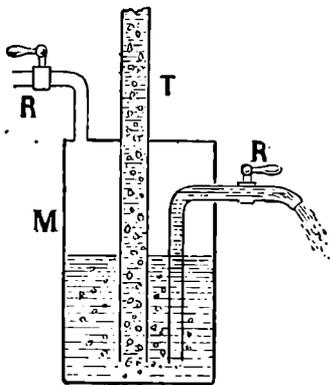
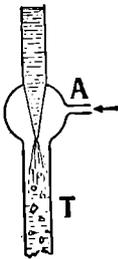


Fig. 210.

III. *Bomba de bicicleta.* — Es todavía más sencilla que la bomba de mano. El émbolo está formado por una especie de campana de cuero flexible (fig. 209, I y II). Cuando se tira de él, se produce el vacío en A; pero la presión atmosférica obliga el aire a pasar entre las paredes del cilindro y el émbolo. Cuando se produce el movimiento inverso del émbolo (fig. 209, II), las paredes de éste se aplican fuertemente contra las del cilindro y, por tanto, el aire se comprime. Entonces, penetra en la cámara de aire del neumático, por medio de la válvula adaptada a la cámara de aire y que sólo puede abrirse de fuera adentro. Se ve que el mismo émbolo sustituye a la válvula de aspiración de la bomba de mano.

199. *Trompas insuflantes.* — Las trompas de agua pueden transformarse fácilmente en aparatos de compresión. Para esto, basta hacer llegar el agua mezclada con aire a un recipiente M (fig. 210). El aire se desprende y se comprime encima del agua. Este aire puede evacuarse por una llave R, al mismo tiempo que se evacua el agua por la R'. De este modo, por

Se puede obtenerse un corriente de aire bajo presión, de donde procede el nombre de *trompa insuflante* que se ha dada a este aparato.

APLICACIONES DE LOS GASES COMPRIMIDOS Y ENRARECIDOS

200. Producción de los gases comprimidos en la industria. — Depósitos de gases comprimidos. — En la industria se utilizan cada vez más los gases comprimidos. Por una parte, la compresión permite transportar, en poco volumen, una masa relativamente considerable de un gas destinado a usos especiales, como el oxígeno, el gas de aceite, etc. Por otra parte, se emplea también el aire comprimido para mover motores.

Depósitos de gases comprimidos. — Los compresores comprimen los gases en recipientes muy resistentes, cuya construcción y dimensión varían según sea el gas, el uso que se haga de él y la presión final.

Por ejemplo, el aire comprimido empleado en los tranvías de la Compañía de ómnibus, está comprimido, primero, en depósitos de acero, llamados *acumuladores*, de 50 centímetros de diámetro exterior, 3^m.17 de longitud, y 4 centímetros de espesor. Este aire es conducido luego subterráneamente, por tubos de acero soldados, a otros acumuladores también de acero que llevan los coches.

El oxígeno y el gas de aceite son conducidos en tubos de acero estirado de 1 metro de altura y 20 cen-

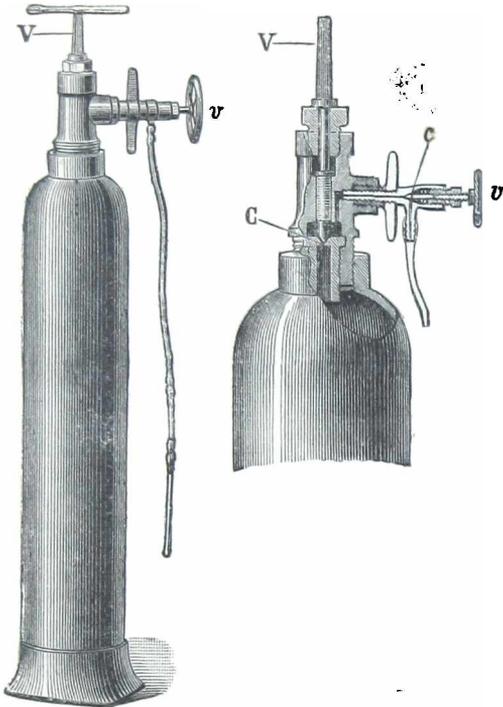


Fig. 211.

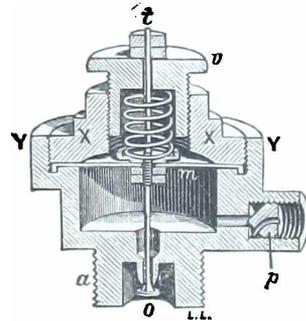


Fig. 212.

tímetros de diámetro exterior, cerrados por llaves de punzón (fig. 211). Estos tubos ensayados bajo una presión de 250 kg. por cm², podrían soportar una presión de 400 kg. por cm².

201. Reguladores de presión. — En la mayor parte de las aplicaciones de los gases comprimidos la presión del gas utilizado debe tener un valor constante, en general muy inferior a la presión que hay en el depósito, la cual varía por supuesto a medida que se vaya empleando (en el caso de los gases comprimidos). Los aparatos destinados a mantener constante esta presión se llaman *reguladores de presión*.

Regulador J. Fournier. — Se compone de dos tuercas XXYY (fig. 212), atornilladas una en otra; la inferior tiene una espiga de tornillo *a* con el fin de fijar el regulador en el depósito. Entre estas tuercas está sujeta una membrana *m* generalmente metálica, en cuyo centro está sujeta una varilla que tiene en la punta inferior un obturador *o* que puede cerrar el orificio de salida del gas. La tuerca superior tiene un tornillo *v* hueco que sirve para variar la tensión del resorte que oprime la membrana. La cámara del aparato lleva lateralmente una abertura que puede ser cerrada total o parcialmente por un punzón micrométrico *p* agujereado.

Al emplearlo, el gas que debe dilatarse pasa por el orificio *o* a la cámara del regulador para recibir una presión mayor que la del recinto donde debe utilizarse, siendo la diferencia entre ambas presiones tanto más grande cuanto más cerrado esté el punzón *p*.

Ya se comprende que si la presión aumenta en el recinto donde se utiliza, aumentará también en la cámara del regulador, hará que la membrana se levante y el obturador *o* no dejará pasar el gas del depósito. Si, por el contrario, disminuye la presión, el obturador, por razón inversa, dejará pasar el gas. El cálculo demuestra, en efecto, que la precisión de la regulación es proporcional a la relación que existe entre las presiones en la cámara del regulador y el recinto de utilización. Luego resulta mucha ventaja en hacer que la caída de presión debida al punzón *p* sea lo mayor posible.

202. **Diversas aplicaciones del aire comprimido y enrarecido.** -- I. *Motores de aire comprimido.* — Ya hace tiempo que se había pensado en emplear la fuerza elástica del aire comprimido para comunicar movimiento a motores, que no introducen en la atmósfera ningún elemento capaz de viciarla y que se han empleado y se emplean todavía en ciertos trabajos subterráneos: tales son las máquinas perforadoras para construir galerías subterráneas.

Las primeras perforadoras, imaginadas por Colladon y Caligny, se emplearon para perforar el Monte Cenís. Compónense de diez taladros en forma de *florete*, puestos en un mismo fuste, y cada uno tiene tres movimientos:

1º Un movimiento de vaivén longitudinal, produciendo golpes repetidos en la roca;

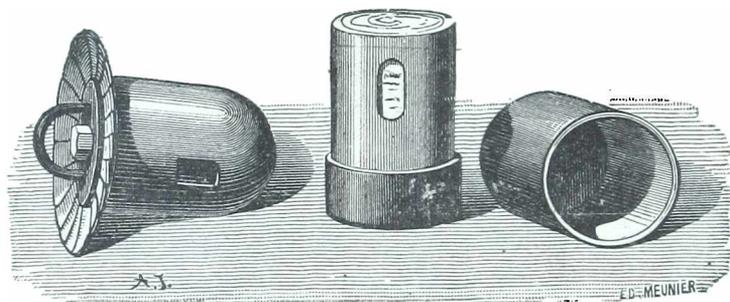


Fig. 213.

2º un movimiento giratorio helicoidal análogo al de un barreno, que produce la penetración; 3º un movimiento de progresión, paralelo al eje del florete y proporcional a la rapidez de la perforación. El aire comprimido comunicaba a los taladros estos tres movimientos. La compresión del aire se obtenía por medio de máquinas, movidas por los saltos de agua inmediatos. Estos procedimientos y máquinas más perfeccionadas se han empleado para perforar otros muchos túneles, tales como los del Saint-Gothard, del Arlberg, del Simplón y del Løtschberg.

Una de las más importantes aplicaciones de los motores de aire comprimido es la tracción de los carruajes. En París hay varias líneas de tranvías de aire comprimido, en las que se emplean los motores de Mekarski. Su principio es el siguiente:

El aire comprimido, almacenado a una presión de 80 kg. en depósitos que lleva el carruaje, pasa, por la acción de un regulador, a una presión mucho más débil que el maquinista puede variar según el esfuerzo necesario para arrastrar el carruaje. El aire así dilatado empuja el émbolo de una máquina análoga a las de vapor; el aire se dilata más y más con el trabajo, y al fin es expulsado. Pero, para que el motor pueda trabajar con bastante rendimiento, es absolutamente necesario compensar a cada momento el enfriamiento considerable que produce la continua dilatación del aire comprimido. Para calentarlo se emplea un cilindro o *calorifero* de acero, de unos 300 litros, casi lleno de agua, cuya temperatura varía, según sea necesario, desde 130° hasta 160°. Cuando sale el aire de los acumuladores de presión llega a la parte inferior de este cilindro que está colocado verticalmente, atraviesa el agua caliente recalentándose y saturándose de vapor de agua y se dirige al motor por conducto del *regulador de presión* que le somete a la presión de utilización, que es generalmente de unas 15 atmósferas.

Fácil es observar que la circulación del aire a través del calorifero produce dos efectos importantes:

1º Recalienta el aire, ya frío por su dilatación en el regulador, antes de entrar en los cilindros de los motores;

2º Además, a medida que el émbolo del motor avanza, el aire que lo empuja experimenta una dilatación que produce una condensación parcial del vapor de que se había saturado en el calorífero; pero esta condensación de vapor desprende calor que recalienta el aire y le ayuda así a efectuar su trabajo en condiciones excepcionales de rendimiento.

II. *Correo neumático.* — Hace ya algunos años que el servicio telegráfico en las grandes ciudades se efectúa por medio del aire comprimido.

Los despachos no se expiden separadamente, sino que van reunidos en grupos de 30 a 40, en estuches de latón cubiertos de cuero. Salen al mismo tiempo diez de éstos estuches formando con un émbolo una especie de *tren* del peso de 4 kilogramos. (La figura 213 representa el émbolo y un estuche abierto). Este tren circula por dentro de un tubo de fundición, de 0,065 m. de diámetro y de 1 a 2 kilómetros de longitud, que enlaza dos estaciones subterráneamente. En la de salida *lo empuja* un depósito de aire comprimido, al mismo tiempo que otro depósito de aire enrarecido *lo aspira* desde la estación de destino. La diferencia entre las presiones ejercidas sobre las dos caras del

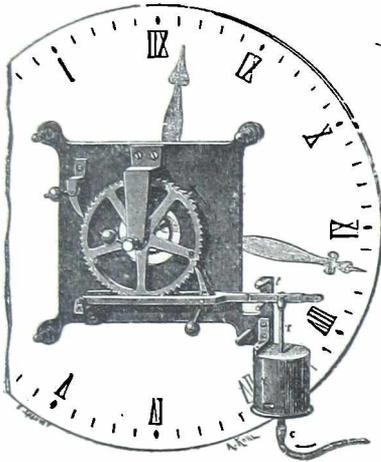


Fig. 214.

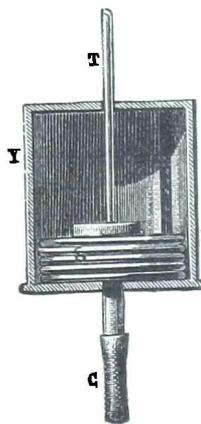


Fig. 215.

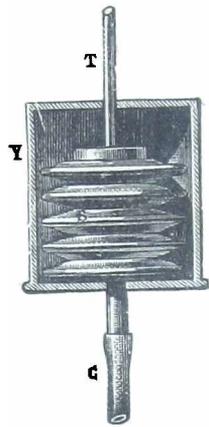


Fig. 216.

tren no pasa de $\frac{3}{4}$ de atmósfera, pero basta para comunicarle velocidad media de 1 kilómetro por minuto.

La distancia entre dos estaciones consecutivas sigue limitada a unos 2 kilómetros próximamente por causa de la disminución rápida que resulta en la tensión de aire comprimido por efecto de la distancia.

III. *Relojes neumáticos.* — Desde 1880 existe en París una red de conductos de aire comprimido que distribuye la hora en París de un reloj principal a diversos relojes secundarios, llamados *relojes neumáticos*, que comunican con el principal.

El *reloj-tipo* es un reloj ordinario provisto además de una excéntrica que, en el momento preciso en que el minutero marca *cada minuto*, descalza un órgano que pone en movimiento el mecanismo de distribución. El aire lanzado a cada minuto a través de la canalización no tiene por lo demás sino un exceso de presión de siete décimos de atmósfera; esto basta para poner en movimiento el mecanismo de los relojes receptores.

El flujo del aire comprimido llega por un tubo C (fig. 214, 215, 216) a un pequeño fuelle S (fig. 215), contenido en un tambor metálico Y. En estado de reposo, el fuelle permanece plegado sobre sí mismo (fig. 215); el flujo de aire llega a inflarlo cada minuto y a impulsar al mismo tiempo un vástago T fijo en su base superior. El movimiento de este vástago T levanta una palanca l, articulada en A (fig. 214), que por medio de un tope r hace adelantar un diente a la rueda dentada R. El eje de esta rueda es el que sostiene el minutero; como la rueda tiene sesenta dientes, cada vuelta completa corresponde a una hora y provoca un movimiento correspondiente en el horario.

IV. *Frenos automotores.* — *Frenos Westinghouse.* — Aplícase también el aire comprimido para manejar los frenos de los coches del ferrocarril. En el sistema Westinghouse cada coche lleva un depósito pequeño de aire comprimido, y un conducto, lleno también de aire comprimido recorre todo el tren. Los frenos de cada coche pueden ser cerrados por medio de un émbolo, móvil en un cilindro, donde es movido por la acción

del aire comprimido. El mecanismo está dispuesto de tal manera que, mientras permanece la presión en el conducto general, los frenos no cierran. Pero si se desaloja el aire de este conducto, el juego de un órgano llamado *triple válvula* envía a los cilindros el aire comprimido de los depósitos, y cierra los frenos. Como se ve, en caso de accidente que causara la ruptura del conducto, todos los frenos cerrarían enseguida.

V. *Limpieza por el vacío*. — Desde hace algunos años, se utiliza para la limpieza de habitaciones, alfombras, tapices, etc., un interesante procedimiento que se funda en el principio siguiente. Por los objetos a que se quiere quitar el polvo, se pasa un tubo provisto de un añadido adecuado y unido por un tubo delgado a una máquina neumática. El polvo es aspirado al mismo tiempo que el aire. Este no llega a la máquina sino después de haber atravesado una especie de filtro, formado por un saco de hilo en el cual deja el polvo, que sale al exterior, por la acción de la bomba.

Se concibe toda la importancia de este procedimiento, en el cual, el polvo, con todos los microbios que contiene, no queda en suspensión en el aire, como sucede con los demás procedimientos usuales de limpieza que, por otra parte, no hacen más que mover el polvo, sin eliminarlo.

203. *Trabajos submarinos*. — El aire comprimido es también el que ha permitido efectuar, con facilidad relativa y seguridad casi absoluta, trabajos bajo el agua de los ríos y de los mares.

1º. *Campana de buzo*. — El origen y primitivo modelo de estos aparatos es la antigua

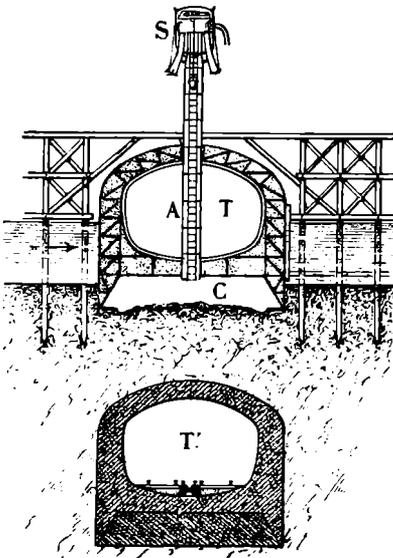


Fig. 217.

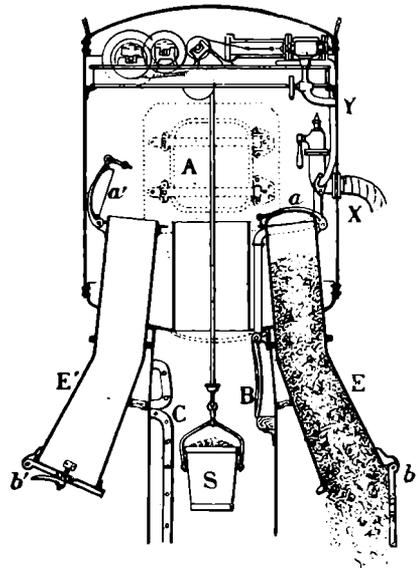


Fig. 218.

campana de buzo, que era una ancha campana llena de aire, abierta por la parte inferior, y herméticamente cerrada en lo alto, que se bajaba con los instrumentos y los obreros hasta el fondo en que se había de trabajar.

2º. *Aparato Triger*. — El primer progreso que se realizó consistía en enviar el aire desde la atmósfera exterior a la campana, para renovar el aire viciado. Otro mayor se debió al ingeniero Triger quien tuvo la idea de enviar a la campana *aire comprimido*, que no sólo alimenta de fluido respirable a los hombres sino que además les permite trabajar casi a pie enjuto, pues expulsa el agua de la campana.

El paso de la presión exterior a la interior no dejaría de presentar peligro para la salud de los obreros si se efectuara bruscamente. Así es que los hombres no penetran en seguida en la campana ni salen tampoco directamente de ahí. Primero penetran en una cámara lateral, que se encuentra a la presión exterior: una vez allí, cierran la puerta, y abren una llave que da a una de las chimeneas laterales y que establece la comunicación y la igualdad de presión entre los dos compartimientos inmediatos. Entonces, puede empujar una puerta, que se abre de fuera adentro y que antes permanecía cerrada por el exceso de presión, y penetra en la chimenea por donde baja al fondo de la cam-

pana. Para salir se efectúa la maniobra inversa, porque es más peligroso todavía pasar de una presión fuerte a otra más débil.

Como ejemplo de los trabajos efectuados por este medio, citaremos la travesía subterránea del Sena, entre la plaza de San Miguel y la del Châtelet, por el metropolitano de París. Estos trabajos han sido efectuados según los planos y bajo la dirección de M. L. Chagnaud. Para la travesía del gran brazo del Sena, la obra ha sido dividida en tres secciones y para el brazo pequeño, en dos solamente. Cada sección, tal como T (fig. 217) ha sido construida de antemano, encima de un cajón C, que forma lo que se llama *cámara de trabajo*. Los obreros penetraban en ella por unas chimeneas (una de las cuales está representada en A), terminadas por cámaras de aire S que comprendían todo lo necesario para el paso de los obreros del exterior al interior y viceversa y los órganos necesarios para sacar la tierra. La figura 218 detalla una de estas cámaras.

A es la puerta por donde el obrero penetra del exterior; B, la puerta por donde aquél entra en la chimenea, después de haber establecido la igualdad de presiones: las líneas de puntos la representan cerrada y las continuas abierta; C es la escalera por donde se baja al cajón. El mecanismo representado en la parte superior de la figura es un torno movido por aire comprimido, que permite subir y bajar los escombros, por medio de un cubo S. Estos se evacúan por las pequeñas esclusas EE' que pueden comunicar con el interior, por *a* y *a'*, o con el exterior, por *b* y *b'*. Se empieza por llenar la esclusa de residuos, estando cerrada la abertura inferior (esclusa E'); después, se vacía, abriendo el orificio inferior, luego de haber cerrado el superior (esclusa E) para impedir que se escape el aire del cajón al exterior. Finalmente, en X se ve la llegada del aire comprimido, y en Y el escape del aire libre.

Ahora, se puede comprender fácilmente cómo se continúa el hundimiento. Los obreros descienden a la cámara de trabajo C (fig. 217) y desmoronan el terreno. Al mismo tiempo el cajón baja poco a poco, y el conjunto acaba por llegar a su posición definitiva T'. Entonces, la cámara de trabajo se llena de mortero y constituye una base sólida en la sección del túnel.

Después, las secciones deben unirse unas a otras, trabajo que se hace con el auxilio de cajones amovibles.

Aparte de las obras que conciernen a la misma travesía del Sena, se han establecido, por el mismo procedimiento de *hundimiento vertical*, dos estaciones, la de la plaza de San Miguel y la de la Cité. Cada estación ha sido construida encima de una cámara de trabajo. El conjunto constituye un inmenso cajón de 60 metros de longitud, por 16,50 de ancho y 12,50 de altura, que se ha sumergido en la vena acuifera contigua al Sena, de tal modo que los rieles del camino de hierro estén a unos 20 metros de profundidad bajo el suelo.

3º *Escafandro*. — Perfeccionamiento más sencillo de la campana de buzo es el escafandro, aparato empleado todos los días por los buzos. Se compone de un vestido de una sola pieza, de hilo forrado de caucho, cuyas mangas terminan en puños también de caucho ajustados por encima mediante una especie de pulseras de la misma sustancia. El vestido se une a un casco de cobre que es la parte principal del equipo. Este casco comunica, por el conducto A (fig. 219) y por el tubo flexible T, con una bomba que envía aire comprimido al casco y a todo el vestido. El exceso de aire, mezclado con los productos de la respiración, se escapa por una válvula S que se abre de dentro afuera. El buzo puede ver en todas direcciones, merced a cuatro tragaluces de gruesos cristales, colocados, uno delante, dos, a los lados, y otro encima del casco. Este último que es el más expuesto a los choques va protegido por una rejilla de cobre.



Fig. 219.

Además, el buzo puede hablar a las personas que queden en el aire, por medio de un tubo acústico T' que, actualmente, se reemplaza, con frecuencia, por un teléfono.

Para que el buzo pueda mantenerse a fondo, a pesar del empuje de Arquímedes, va cargado con dos gruesas planchas de plomo, una, P, en el pecho y otra en la espalda. Su calzado tiene también una suela densa de plomo y punteras de bronce, con objeto de evitar el desgaste.

A la cintura lleva atada una cuerda para subirlo; pero también puede subir o bajar a su antojo, por el procedimiento siguiente : Apoyando la válvula con la mano, la mantiene cerrada; el aire que llega se esparce por el vestido, lo infla, y, aumentando el empuje, sube. Al contrario, para bajar, se apoya en un botón interno que forma cuerpo con la válvula y la mantiene abierta de modo que, escapándose el aire, no se infle el vestido.

Para contrarrestar los peligros debidos a las variaciones bruscas de presión, la bajada debe hacerse lentamente y la subida aun más lentamente, a razón de un metro por minuto, si se quiere evitar cualquier accidente.

BOMBAS PARA LÍQUIDOS

204. **Definiciones.** — Las bombas para líquidos son máquinas que sirven para elevar y transportar el agua o un líquido cualquiera de un depósito a otro.

Se clasifican en varias categorías, según el mecanismo empleado.

205. **Bombas aspirantes.** — Una bomba aspirante (fig. 220) se compone de los órganos siguientes :

1º Un cilindro o un cuerpo de bomba que lleva en su parte superior un conducto lateral por donde sale el agua, y taladrado en su base por un ancho agujero tapado por una válvula S, que se abre de abajo arriba; 2º de un tubo de aspiración A, adaptado por una parte al cuerpo de bomba y que por la otra extremidad penetra en el líquido que se trata de elevar; 3º de un émbolo P sostenido por una varilla a que se imprime un movimiento de vaivén. El émbolo tiene en su centro un agujero ancho, cerrado por la válvula O, que se abre de abajo arriba. Las

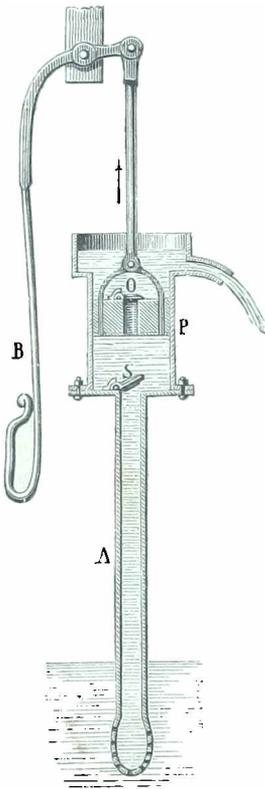


Fig. 220.

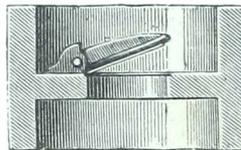


Fig. 221.

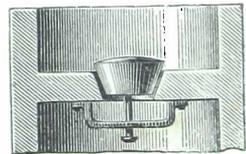


Fig. 222.

válvulas empleadas son de dos formas : *válvulas de bonete* (fig. 221), y *cónicas* (fig. 222).

Funcionamiento. — Supongamos que el émbolo está para empezar en lo más bajo de su camino. Cuando se eleva, tiende a hacerse debajo el vacío, y la válvula O permanece cerrada en virtud de la presión atmos-

férica, mientras que el aire del tubo A levanta la válvula S en virtud de su elasticidad y penetra parcialmente dentro del cuerpo de bomba. Enrarecido el aire de esta manera, el agua debe subir evidentemente en el tubo hasta que la presión de la columna líquida elevada, añadida a la tensión del aire restante en el tubo equilibre a la presión atmosférica que se ejerce sobre el agua del pozo. Al bajar el émbolo, la válvula S se cierra por su propio peso. El aire comprimido por el émbolo, levanta la válvula O y se pierde en la atmósfera. Al segundo golpe de émbolo se reproduce la misma serie de fenómenos y al cabo de unos cuantos penetra por fin el agua en el cuerpo de bomba. Entonces se dice que ésta se encuentra *cargada*.

A partir de este momento, cambia el funcionamiento del aparato : durante el descenso del émbolo, la válvula S se cierra, el agua comprimida levanta la válvula O y penetra encima del émbolo, que la levanta después, llevándola hasta el *tubo de salida*. Entonces el agua inferior, empujada por la presión atmosférica, sigue al émbolo en su trayecto.

Se ha visto que la presión atmosférica no puede sostener más que el peso de una columna de agua de 10 m. 33 : luego el tubo de aspiración no puede pasar una *altura límite* de 10 m. 33 sobre el nivel del agua en el pozo, pues en el caso contrario *la bomba se descargaría*. En la práctica, a causa de los escapes inevitables) la altura del tubo de aspiración apenas excede de 8 metros; pero el *tubo de salida* puede elevarse tanto como se quiera.

Bomba aspirante y elevatoria. — Cuando la bomba está dispuesta de modo que pueda elevar el agua a gran altura, se le da el nombre de *bomba aspirante y elevatoria* (fig. 223).

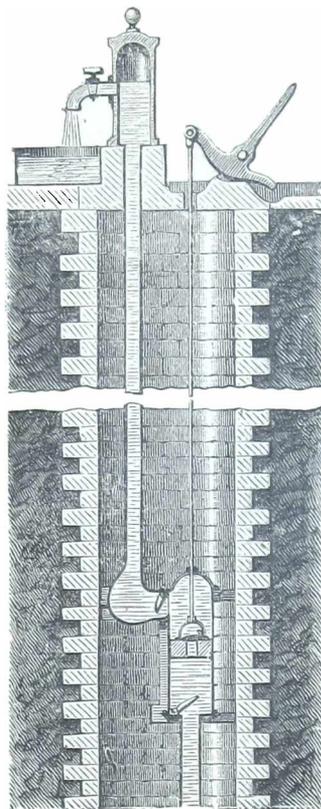


Fig. 223.

206. *Esfuerzo y trabajo necesarios para manejar la bomba aspirante.* — Cuando baja el émbolo, la presión es sensiblemente la misma sobre sus dos caras y sus efectos se compensan. Todo el esfuerzo de la maniobra se emplea, pues, en vencer los rozamientos.

Cuando sube el émbolo, las presiones que se ejercen sobre sus dos caras son notablemente distintas.

Sean S la sección del émbolo (fig. 226), e su grueso. H la altura de la columna de agua capaz de equilibrar la presión atmosférica; z la altura variable de la base del émbolo sobre el nivel del pozo, y h la altura constante del orificio de salida sobre el mismo nivel; por fin D la densidad del líquido (que ordinariamente es agua). Expresemos en dinas por cm^2 , la fuerza F que actúa de arriba abajo sobre la cara superior del émbolo. Es evidentemente igual a la presión atmosférica SHDg aumentada con el peso de la columna de agua levantada. Tiénese pues

$$F = SHDg + S(h - z - e) Dg.$$

La fuerza F' que actúa de *abajo arriba*, sobre la cara inferior, es análogamente

$$F' = S HDg - S \varepsilon Dg.$$

La diferencia, que mide el *esfuerzo* necesario, es

$$f = F - F'.$$

o bien, desdénando el grueso e del émbolo,

$$f = ShDg.$$

Así el *esfuerzo necesario durante la maniobra es igual en todos los puntos del camino del émbolo*.

Cuanto al trabajo, es igual al producto del *esfuerzo* f por la longitud l del camino del émbolo. Tiénesse, pues,

$$T = fl = ShDgl = S l Dg \times h.$$

Interpretación del trabajo gastado. — Observemos que el producto $S l Dg$ representa el peso de un cilindro del líquido, igual a la capacidad del cuerpo de bomba (hasta el orificio de salida) quiere decir al que la bomba arroja en cada golpe del émbolo. Por otra parte, h representa la distancia vertical que existe entre el nivel del pozo y el lugar donde se recoge el agua de la bomba. El producto $S l Dgh$ representa pues el trabajo que se invertiría en subir directamente el peso de agua que arroja la bomba a cada golpe de émbolo. De consiguiente, la bomba de agua *no crea trabajo*; hace lo mismo que todas las máquinas, *transformar* el trabajo, permitiendo su producción en condiciones de mayor comodidad y rapidez.

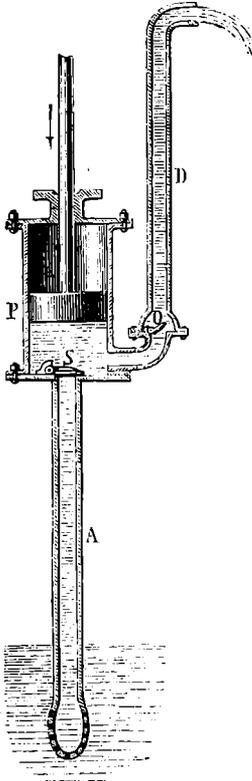


Fig. 224.

207. Bombas aspirantes e impelentes. — La bomba aspirante e impelente eleva el agua por aspiración y compresión al mismo tiempo.

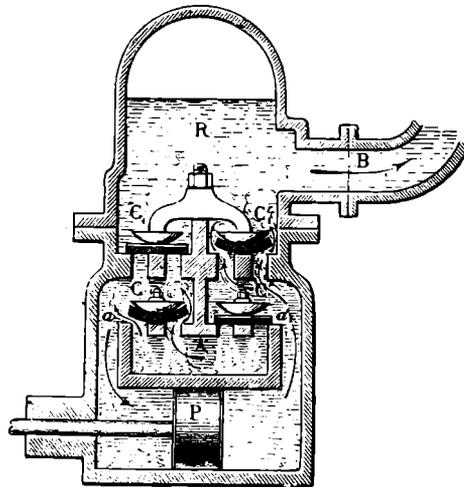


Fig. 225.

En el tipo usual (fig. 224), el émbolo es macizo, y la base del cuerpo de bomba está provista de una válvula S que se abre de *abajo arriba* y cierra un tubo de aspiración A . En el lado del cuerpo de bomba está el tubo de ascensión D con su válvula O . Cuando la bomba funciona, el agua es aspirada por el tubo A cada vez que el émbolo sube, e impulsada después por el tubo D cuando baja.

208. **Bombas de salida continua.** — **Bombas de doble efecto.** — En los aparatos precedentes no es continua la salida, pues se interrumpe, ya cuando baja el émbolo en las bombas aspirantes, ya cuando sube en las impelentes, ya por fin en los *puntos muertos* del émbolo. Desde hace mucho tiempo se procura obtener la salida continua, y ésta se ha logrado en las bombas de *doble efecto*, a las cuales se añade un *depósito de aire*. Todos estos perfeccionamientos se han llevado a cabo en la bomba Thirion, cuyo corte se halla representado en la figura 225 y vista exteriormente en la figura 226; en ésta última se ve, en M, una pequeña máquina de vapor, cuyo émbolo está unido, por su varilla, con el émbolo de la bomba que pone también en movimiento. El tubo de aspiración A (fig. 225 y 226) desemboca en una especie de caja cerrada por dos bonetes CC (fig. 225) * que pueden hacerla comunicar con el cilindro por los conductos *a* y *a'* y con el depósito R por los bonetes *C*₁ y *C*₁'.

Cuando el émbolo se mueve de izquierda a derecha, la válvula C se eleva y el agua,

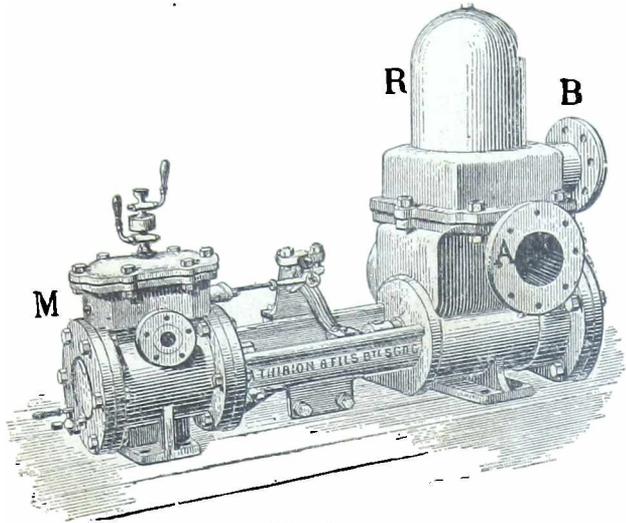


Fig. 226.

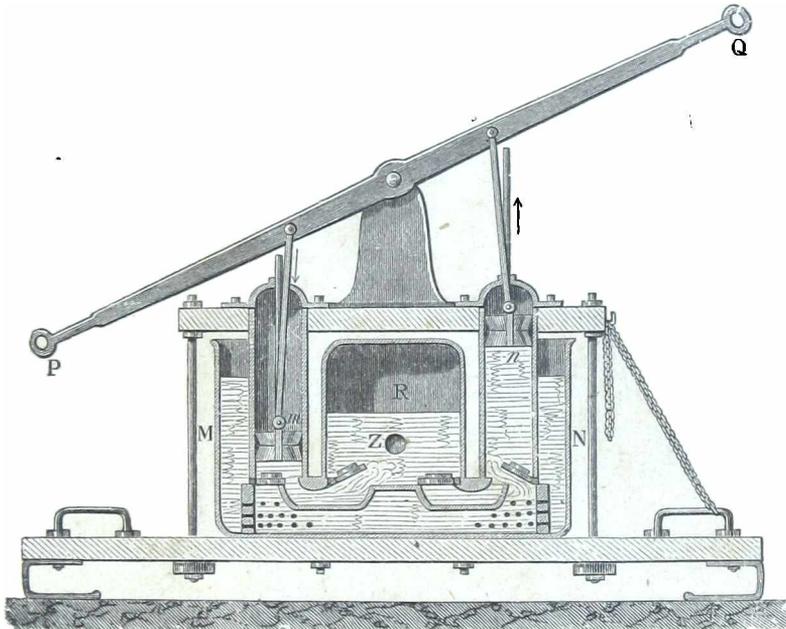


Fig. 227.

aspirada por A, llena el compartimiento de la izquierda del cilindro. Al mismo tiempo, el agua que se hallaba a la derecha, eleva el bonete *C*₁' y va a parar al recipiente R

* Cada bonete está constituido por una lámina de caucho apretada en su centro y que recubre un orificio anular. Su ascensión está limitada por una pieza metálica en forma de campana invertida.

y luego, al exterior, por el orificio B que comunica con un tubo de salida. Cuando el émbolo vuelve en sentido inverso, produce aspiración en la derecha y la salida en la izquierda; los bonetes CC', se cierran, mientras que C' y C, se abren. Se ve que, en cada carrera, hay al mismo tiempo aspiración y repulsión: y por esto se denomina la bomba, de doble efecto.

El depósito de aire R desempeña el siguiente papel: en su parte inferior contiene agua, y aire, en la superior. Cuando un movimiento del émbolo envía bruscamente el agua por T, ésta se acumula en parte en el depósito R cuyo aire se halla comprimido. Cuando el

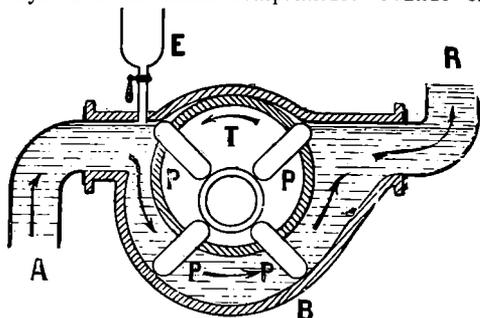


Fig. 228.

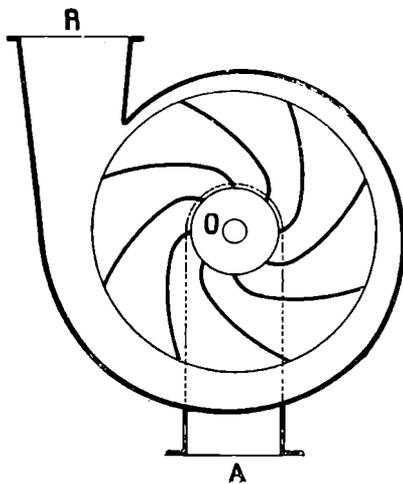


Fig. 229.

émbolo deja de rechazar el agua, el aire comprimido, que se dilata, hace evacuar por B el agua acumulada en el depósito. De este modo, la salida del agua queda regularizada.

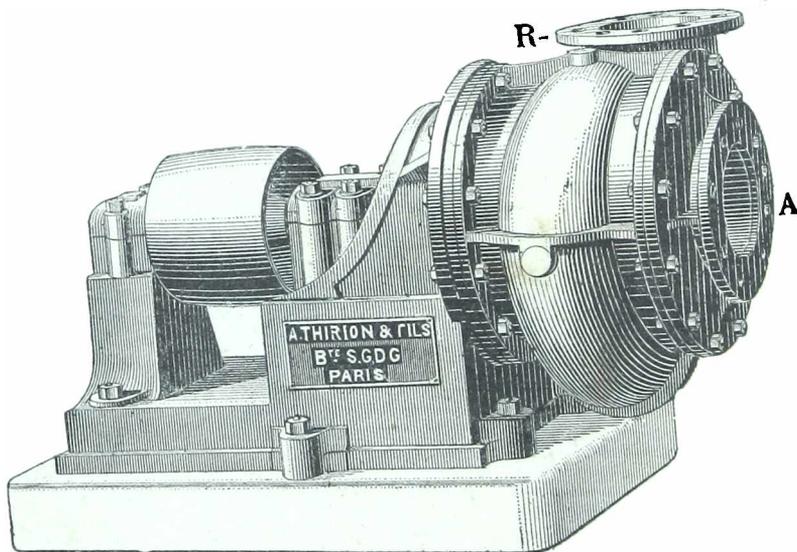


Fig. 230.

209. Bombas de incendios. — Se construyen bombas de incendios *movidas a brazo* y *movidas por el vapor*.

Bomba movida a brazo. — Se compone de dos bombas impelentes reunidas *m* y *n* (fig. 227), que son puestas en movimiento por un mismo balancín PQ, que manejan ocho hombres al mismo tiempo. Estas bombas están sumergidas en una caja ó artesa MN' que se mantiene llena de agua mientras funciona el aparato. Según la disposición de las válvulas, se ve que cuando una de las bombas aspira el agua de la artesa, la otra la impulsa a un compartimiento de aire R que se llama el *depósito de aire*; desde allí

la reacción del gas la impulsará hacia un orificio Z, y al largo tubo de cuero que se dirige sobre el foco del incendio.

Bomba de vapor. — La bomba Thirion, que acabamos de describir (fig. 226), se emplea, a menudo, como bomba de incendios. En este caso, se instala en un carro, con la caldera necesaria para alimentar la máquina de vapor *. Este carro puede ser tirado por caballos o movido por un motor.

Semejantes bombas se construyen con diferentes potencias. El tipo en que se emplee una máquina de vapor de 40 caballos puede lanzar el agua a 45 metros de altura y suministrar 2 100 litros por minuto.

210. Bombas rotatorias. — Las bombas rotatorias producen la elevación del líquido por medio de un órgano animado de un movimiento de rotación continuo.

Bomba rotatoria de paletas. — Esta se compone de una caja de hierro fundido, en la cual gira un tambor T (fig. 228) provista de cuatro paletas móviles. Se hace girar el tambor y, por efecto de anillos interiores que las guían, las paletas se apoyan siempre sobre la superficie interna de la caja. La bomba se ceba llenándola de agua por un embudo E. Entonces se ve que el agua es aspirada en A para salir por R.

Bombas centrifugas. — Una bomba centrifuga de baja presión (fig. 229 y 230) consiste en una caja de fundición que tiene dos aberturas, una central O, a la cual llega el tubo de aspiración A, y la otra lateral de la cual parte el tubo de repulsión R. En el interior gira rápidamente un árbol provisto de álabes curvos. Por efecto de la fuerza centrifuga, el agua que aspira A pasa a la periferia, de donde la extrae el tubo R. La bomba representada en la figura 230 se mueve merced a un motor mecánico, por una correa que pasa por una polea de transmisión. A menudo, se mueven también, las bombas centrifugas, por motores eléctricos.

211. Sifones. — Un sifón es un aparato que sirve para pasar fácilmente el líquido de un vaso a otro colocado a un nivel inferior.

El sifón ordinario consiste sencillamente en un tubo

encorvado de ramas desiguales (fig. 231). Para servirse del sifón hay que *cargarlo*. Con tal fin se le vuelve y se llena directamente; después se cierran momentáneamente sus dos orificios y se le coloca de modo que la rama menor penetre en el líquido que se va a trasvasar M. O bien se pone primero el sifón en su sitio y se aspira con la boca por el orificio M' hasta que se llene del líquido por efecto de la presión atmosférica.

Quando el líquido que se trasvasa es corrosivo, se usan sifones de tres ramas. Este tercer brazo es un tubo lateral M (fig. 232).

Sea cual fuere el método empleado para cargar el sifón, la salida continúa en dirección de la rama menor a la mayor, mientras está sumergida en el líquido la primera.

Teoría del sifón. — Vamos a demostrar que si las ramas del sifón son desiguales, no es posible el equilibrio. Supongamos para eso que el equilibrio existe con las alturas h , h' , de las ramas (fig. 231), y sea H la altura del líquido que equilibra la presión atmosférica. Consideremos una capa líquida m situada en la parte superior del tubo. La presión en M es el peso de una columna de líquido que tiene por altura H y por base 1 cm^2 . Luego la presión en m es el peso de una columna de líquido de 1 cm^2 de base y de altura

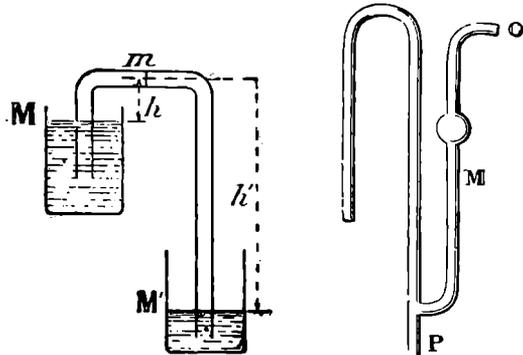


Fig. 231.

Fig. 232.

* Esta caldera es un generador tubular especial, de construcción sencilla y sólida que permite producir gran cantidad de vapor, aunque su volumen sea muy reducido.

II — h . Como la presión en M' es también igual a la presión atmosférica, así la presión en m es también igual al peso de una columna de líquido con 1 cm^2 de base y de altura $H - h'$. Para que exista el equilibrio es preciso que

$$H - h = H - h', \quad \text{de donde} \quad h = h'.$$

Luego el equilibrio exige que las ramas del sifón tengan la misma altura vertical. Si son desiguales se verificará la salida.

Esta no solo puede hacer del vaso inferior hacia el superior. En efecto, se podría hacer caer de M en M' el líquido traído continuamente por el sifón y utilizar la energía de esta caída para producir un trabajo mecánico. Luego en este sistema se crearía trabajo sin gasto equivalente, lo cual es contrario al principio de la conservación de la energía. Luego la salida sólo puede efectuarse del vaso superior al inferior.



Fig. 233.

212. Pipeta. — Consiste en un sencillo tubo recto, con punta (fig. 233) que sirve para tomar un poco de líquido en un recipiente que no se quiere mover.

Introdúcese la pipeta en el líquido por su punta afilada, quedando abierto el orificio superior. El tubo se llena, sea por simple comunicación, sea por aspiración. Entonces se retira el instrumento del líquido, colocando el dedo sobre el orificio superior. La presión atmosférica, que se ejerce en el orificio inferior, basta para mantener el líquido en la punta afilada. Pero si se da aire levantado el dedo, la salida ocurre inmediatamente. Basta tapar el orificio para que se detenga: las escasas gotas de líquido que todavía salen bastan para enrarecer el aire confinado encima del líquido. La salida se detiene en el momento en que la presión del gas, aumentada con la presión que ejerce la columna líquida, iguala la presión atmosférica.

LIBRO IV

NOCIONES DE CAPILARIDAD. — NOCIONES DE HIDRODINÁMICA COMPRESIBILIDAD DE LOS LÍQUIDOS

CAPÍTULO I

NOCIONES DE CAPILARIDAD. — FUERZAS MOLECULARES

213. **Fenómenos capilares.** — Cuando se sumerge un cuerpo sólido en un líquido que lo moja — por ejemplo una varilla de vidrio bien limpia, en el agua, — el líquido se eleva en torno del cuerpo sólido, y su superficie deja de ser horizontal para tomar forma cóncava (fig. 234).

Por el contrario, si el cuerpo sólido sumergido no es mojado por el líquido, — según pasa con el vidrio en contacto del mercurio, — el

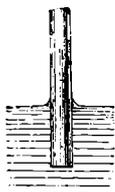


Fig. 234.



Fig. 235.

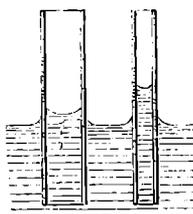


Fig. 236.

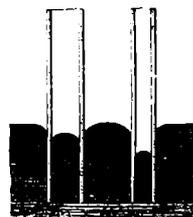


Fig. 237.

líquido se deprime en vez de elevarse, y su superficie toma forma convexa alrededor del cuerpo sumergido (fig. 235).

Además, la superficie del líquido afecta la misma curvatura: cóncava o convexa, junto a las paredes del vaso que lo contiene, según las moje o no.

Estos fenómenos son más aparentes cuando en vez de una varilla maciza se introducen en el líquido tubos de vidrio huecos de pequeño diámetro. Según que estos tubos son mojados o no, así se produce una

ascensión o una depresión del líquido, tanto mayor cuanto más pequeño es el diámetro (fig. 236 y 237). Además, cuando los tubos son mojados la superficie libre del líquido toma en ellos la forma de una curva cóncava, análoga a un segmento esférico; esto es lo que se llama un *menisco cóncavo*; si no son mojados, la columna deprimida termina en una superficie curva convexa, que se llama *menisco convexo*.

Estos fenómenos están en contradicción con las leyes de la hidrostática; en general se les da el nombre de *fenómenos capilares* por alusión a los que se verifican en los tubos finos, cuyo diámetro puede ser comparado al de un cabello (*capillus*). Los que hemos citado no son los únicos que existen, y pronto estudiaremos otros nuevos.

214. **Leyes de la ascension de los líquidos en los tubos capilares.** — **Leyes de Jurin.** — Para estudiar la ascensión de un líquido en un tubo capilar, se escoge un tubo bien limpio: se lo sumerge en el líquido y se aspira en su parte superior: el líquido moja el tubo. Si se deja de aspirar, el líquido cae y se detiene a cierta altura; el menisco líquido se con-

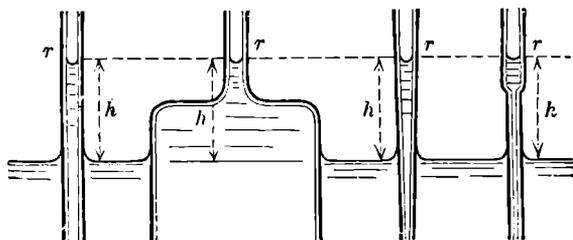


Fig. 238.

juga entonces tangencialmente con la pared. En caso de un tubo cilíndrico y vertical, se llama *altura media* a la altura de un cilindro que tuviera el mismo volumen que la columna líquida levantada.

LEYES. — 1ª Para un mismo líquido, la altura

media levantada depende únicamente del diámetro del tubo, en la región en que se halla el menisco, y no de la forma del tubo capilar debajo de ese menisco.

Así, en los diversos tubos que representa la figura 238, la altura levantada es la misma; puesto que, al nivel del menisco, el diámetro de los tubos es el mismo.

2ª La altura media levantada es independiente de la sustancia de las paredes del tubo y del espesor de éstas.

3ª Para tubos de diámetro diferente, las alturas medias levantadas están en razón inversa de los diámetros de estos tubos. Esta ley se denomina ley de Jurin.

4ª Para diversos líquidos y a una misma temperatura, las alturas medias levantadas en un mismo tubo capilar varían con la naturaleza del líquido.

Por ejemplo, en un tubo de vidrio de 1 mm. de diámetro, el agua se eleva a 3 centímetros y el alcohol a 1 centímetro.

5ª En todos los líquidos, las alturas medias levantadas en un mismo tubo capilar disminuyen (hasta ser nulas) cuando la temperatura se eleva.

Estudio experimental de las leyes. — La mayoría de las leyes que preceden fueron, en primer lugar, previstas teóricamente por Laplace.

Duespués, han sido establecidas experimentalmente, primero, por Gay-Lussac, luego, mucho después, por Desains, Frankenhein, Simon (de Metz), Quet, Valson, Wilhelmy, y Quincke (de Heidelberg). Van der Mensbrugge, Wolf, etc,

215. **Contacto de los líquidos y de los sólido no mojados. — Ángulo de conjunción. — Ley de las depresiones capilares.** — Los fenómenos capilares se complican y son menos claros en el caso de que el líquido no moje la sustancia del tubo capilar. Por ejemplo, si en una superficie plana y horizontal PQ (fig. 239), bien limpia se vierten algunas gotas de un líquido que no la moje, este líquido forma generalmente una especie de masa más o menos redondeada ABC (*gota ancha*), que se continúa con la superficie sólida por un ángulo determinado ω , que se llama *ángulo de conjunción*.

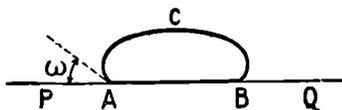


Fig. 239.

La experiencia ha demostrado que el ángulo de conjunción *no es constante* entre un mismo líquido y un mismo sólido. Para el vidrio y el mercurio en particular se ha observado que puede variar, *sin razón aparente*, entre 38° y 45°. La variación es *a fortiori* mayor y más brusca cuando hay causa aparente, tal como la interposición de la menor capa de sustancia extraña sobre el líquido y el sólido que están en contacto.

Leyes de la depresión de los líquidos en los tubos capilares. — La ley de Jurin se aplica a las depresiones de los líquidos en los tubos que éstos no mojan. Puede enunciarse así :

Para un mismo líquido, y a una misma temperatura, las depresiones medias en los diversos tubos capilares están en razón inversa de los diámetros de estos tubos.

Pero la depresión es función del ángulo de conjunción, y esto ha hecho difícil y poco precisa la verificación de la ley.

216. **Causas de los fenómenos capilares. — Tensión superficial.** — Todos los fenómenos capilares se reducen a un estado de tensión particular de la superficie de un líquido que van a revelarnos los experimentos siguientes :

Experimento de Pasteur. — Se introduce una varilla de vidrio en un baño de mercurio, cuya superficie se ha espolvoreado previamente con arena. En seguida, se ve que la arena desaparece por el agujero formado. En cuanto se retira la varilla, reaparece la arena y recobra su posición primitiva.

El mismo resultado se ha obtenido en un baño de agua espolvoreado con licopodio.

Experimento de Dupré. — Tómate un vaso cuadrangular llano ABCD (fig. 240), cuya pared metálica CD es móvil en torno de una bisagra que coincide con la arista C. Por medio de un hilo atado en E se aplica y se mantiene la pared CD contra un calzo, según la dirección CD₁. Entonces se echa agua hasta los bordes del vaso y, una vez obtenido el equilibrio, se quema bruscamente el hilo D₁E : entonces se ve que la pared CD₁ vuelve por sí sola a su posición normal CD. Ahora bien, la presión hidrostática

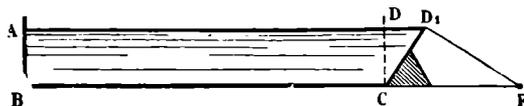


Fig. 240.

tendería, por el contrario, a mantenerla apretada contra el calzo : precisa pues que haya una fuerza de *tracción tangencial* que la lleve a la vertical.

Estos experimentos demuestran que la superficie de un líquido se comporta como si estuviese formada de una especie de membrana estirada, y se explican por la hipótesis siguiente : Consideremos la superficie ABCD (fig. 241) de un líquido y una recta MN trazada en esta superficie.

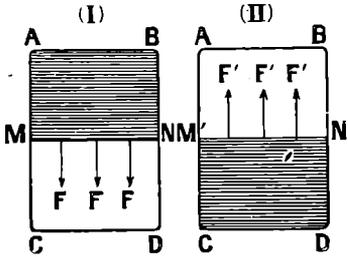


Fig. 241.

Si pudiéramos suprimir la porción MNCD de la superficie del líquido, para mantener la otra en equilibrio, habría que ejercer fuerzas FFF normales a MN y de intensidad proporcional a la longitud MN. Asimismo, si se suprimiera la porción MNAB, sería preciso, para mantener en equilibrio la otra porción, ejercer fuerzas F'F'F' iguales y directamente opuestas a las fuerzas F. Luego podemos decir que una línea cualquiera MN (fig. 242) trazada en la superficie está en equilibrio por la acción de fuerzas iguales y opuestas, F, F', normales a esta línea. Además, si l es la longitud de un elemento de esta línea y F la fuerza a que está sometido, se demuestra que la igualdad $T = \frac{F}{l}$ es constante para cualquier punto considerado en la superficie. Se le denomina *constante capilar* o *tensión superficial* *.

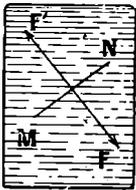


Fig. 242.

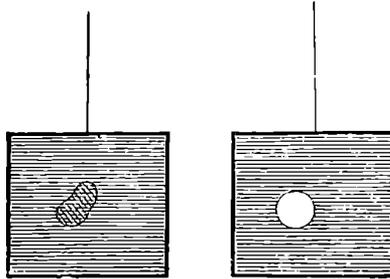


Fig. 243.

El experimento siguiente, debido a Van der Mensbrugge, confirma esta manera de ver.

Se toma un bastidor de alambre de hierro (fig. 243) y se le sumerge en el líquido glicérico de Plateau** ; cuando se le saca, queda encima una lámina líquida plana, que no pasa del marco.

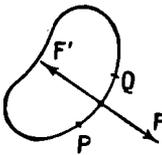


Fig. 244.

Sobre esta lámina se pone con cuidado un bucle hecho de hilo de seda muy fino empapado en el mismo líquido ; después se tuerce un pedazo de papel y se atraviesa con él la seda, de modo que desaparezca el líquido interior ; inmediatamente se ve que el contorno del bucle se extiende y acaba por formar una circunferencia de círculo.

En este experimento se han suprimido con el líquido interior en el

* Esta magnitud se expresa naturalmente en el sistema C. G. S. en dinámicas por centímetro.

** Este líquido glicérico ha sido preparado por Plateau, a fin de reemplazar ventajosa-

buele las fuerzas F' correspondientes; las fuerzas tales como F han obrado y estirado el hilo (fig. 244). El hecho de que el hilo toma exactamente la forma circular, prueba que las fuerzas de tensión superficial son normales a las líneas en que ejercen su acción y proporcionales a la longitud de esas líneas.

OBSERVACION. — La tensión superficial varía de un líquido a otro. Para un mismo líquido depende del medio que la baña y de su temperatura.

217. **Origen de la tensión superficial. — Fuerzas moleculares. — Adherencia. — Cohesión.** — La causa de la tensión superficial debe buscarse en las atracciones que se ejercen entre las partículas de las diversas materias. Por otra parte, estas atracciones moleculares cesan a distancias muy pequeñas.

Cohesión. — La *cohesión* de los sólidos se atribuye a las fuerzas moleculares: aquélla es tan grande porque las partículas están muy próximas.

Adherencia. — Cuando se establece un contacto tan perfecto como sea posible entre dos sólidos, para separarlos, después, se requiere un esfuerzo más ó menos considerable. Se dice que entre ellos existe *adherencia*, la cual se mide por dicho esfuerzo. Si, por ejemplo, se aplica uno contra otro dos planos de cristal bien pulimentados, se hace muy difícil separarlos (experimento de los *planos de Magdeburgo*). Del mismo modo, dos mitades de una bala de plomo, separadas mediante una navaja de afeitar, y aproximadas inmediatamente se adhieren con gran fuerza.

La adherencia de polvos se facilita por la presencia momentánea de un líquido que desaparece en seguida; este es el principio de la acción aglutinante del *mortero*, la *cola*, los *barnices*.

Fenómenos de tintura. — De igual manera se explican los fenómenos de tintura, en los cuales la materia colorante se adhiere fuertemente a los tejidos. Verdad es que, en algunos casos, hay combinación química de la materia colorante y del tejido; pero, en otros, el fenómeno sólo puede atribuirse a la adherencia, como en el de una materia colorante sólida, como el cinabrio o el ocre, adherida a la seda por un simple contacto del tejido con un baño que contenga en suspensión estas sustancias.

Adherencia y cohesión de los líquidos. — De igual manera, los líquidos se adhieren a los sólidos y se adhieren también entre sí. Si, por ejemplo, **sumergimos una varilla de vidrio en agua**, siempre queda una gota suspendida de su extremo: lo cual prueba que hay atracción entre el vidrio y el líquido.

Con frecuencia, se observa esta adherencia en la construcción del barómetro, cuando se le endereza después de llenado. Entonces, ocurre que el mercurio queda adherido al vértice del tubo. En este sitio, el líquido se halla en estado de *tensión* o de *presión negativa*, es decir que tira de las paredes del tubo, tendiendo a llevarlas hacia dentro.

Experimento de Leduc y Sacerdote. — Leduc y Sacerdote han producido este fenómeno de modo particularmente extraño. Han construido una especie de barómetro de sifón de 5 metros de altura, que llenaban de agua bien hervida (con objeto de suprimir toda huella de gas disuelto). Luego, producían el vacío en la rama pequeña. El agua no abandonaba el vértice del tubo.

Este experimento demuestra también la existencia de la cohesión del líquido; pues, a mente el agua de jabón en la producción de las burbujas y en los demás experimentos análogos. Compónese de una mezcla de tres volúmenes de agua de jabón (jabón de Marsella, 25 gramos por litro bien filtrada con dos volúmenes de glicerina pura).

no ser por ésta, la columna líquida se quebraría. De todos modos, la cohesión de los líquidos no es idéntica a la de los sólidos. En éstos se conocen dos especies de cohesión : la *cohesión normal*, resistencia que ofrecen las diversas partes del sólido a separarse bajo el efecto de una tracción normal, y *cohesión tangencial*, que es la resistencia ofrecida al deslizamiento de dos de estas partes, como, por ejemplo, de los dos planos de vidrio aplicados uno contra otro. Según los experimentos que preceden, los líquidos poseen una cohesión normal muy notable; en cambio, su cohesión tangencial es extremadamente débil*.

Intensidad de las fuerzas moleculares. — Para explicar los fenómenos capilares hay que suponer que las fuerzas moleculares son enormes, comparadas con las fuerzas de la gravitación. La ley de Newton no se aplica a estas fuerzas, mientras la distancia de las moléculas no exceda a otra distancia, también sumamente pequeña, llamada su *radio de actividad*.

Capas de pasaje. — *Experimentos de Vincent.* — Cuando se yuxtaponen dos sustancias diferentes, las moléculas de una de ellas ejercen fuerzas sobre las moléculas de la otra. Por lo tanto, debe existir, en ambas partes de la superficie de separación, una especie de *capa de pasaje*, cuyas propiedades son distintas a las del seno de las masas de los dos cuerpos. Se ha tratado de medir el espesor de esta capa. Citaremos los experimentos de M. G. Vincent, que se fundan en la medida de la resistencia eléctrica de bandas de plata extremadamente delgadas, depositadas químicamente en láminas de vidrio. Por otra parte, se mide el espesor por un procedimiento interferencial (671). Vincent atribuye a la capa de paso o de pasaje entre el vidrio y la plata un espesor de 0,05 μ .

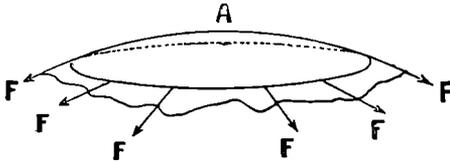


Fig. 245.

218. *Consecuencias de la tensión superficial.* — *Fórmula de Laplace.* — Consideremos una masa de líquido, limitada por una superficie convexa, por ejemplo, y tracemos sobre esta superficie una curva cerrada rodeando un punto A (fig. 245). La acción de la parte del líquido fuera del casquete considerado se traduce por las fuerzas de tensión superficial F, F. Se concibe que estas fuerzas tengan por efecto

aumentar la presión en el interior del casquete, como en un globo de caucho la tensión de la membrana produce en el interior una presión superior a la presión atmosférica.

Una fórmula de Laplace (que no nos detendremos a demostrar) da el exceso de presión p que se encuentra atravesando en A la superficie curva, en función de los radios de curvatura principales R, R' de la superficie en ese punto y de la tensión superficial T :

$$p = T \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right);$$

p es un aumento de presión cuando se pasa del lado convexo al cóncavo, y una disminución en el caso contrario.

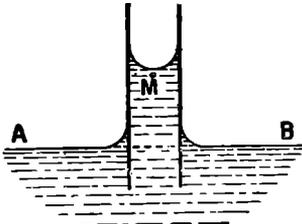


Fig. 246.

219. *Teoría de diversos fenómenos capilares.* — I. *Tubos capilares.* — 1º Consideremos el caso de un líquido que moja el tubo. Sea AB (fig. 246) la superficie libre plana en el vaso exterior. Cuando se aspira el líquido en el tubo perfectamente limpio, el líquido humedece las paredes que toca. Así es que el menisco se separa tangencialmente de la pared, de modo que, si el tubo es estrecho, podemos suponer que el menisco es una semiesfera con el mismo radio r que el tubo. En un punto M, situado inmediatamente debajo del menisco, se verifica una presión que, según la fórmula

de Laplace, es inferior a la presión atmosférica en la cantidad $p = \frac{2T}{r} = \frac{T}{D}$ (D, diáme-

* *Frotamiento interior o viscosidad.* — De todos modos, cuando se quiere hacer resbalar una contra otra dos secciones líquidas, lo cual sucede en los remolinos que produce un cuerpo en movimiento, se origina un frotamiento particular, llamado *frotamiento interior o viscosidad*, que calma los remolinos y motiva la transformación en calor de la fuerza viva del líquido en movimiento. La viscosidad existe también en los gases, pero muy pequeña.

(tro del tubo). Produciendo efecto la presión atmosférica en todos los puntos del plano AB, es necesario que el punto M, donde se efectúa una presión inferior, esté situado en el líquido a una altura mayor.

Sea h la altura de M por encima de AB, μ la masa específica del líquido, g la intensidad de la gravedad; la diferencia de presión p entre M y los puntos de AB es $h \mu g$: se tiene pues

$$h \mu g = \frac{4T}{D}, \quad \text{de donde} \quad h = \frac{4T}{D \mu g}.$$

Esta fórmula demuestra bien que, conforme al experimento, la altura debe variar en razón inversa del diámetro del tubo.

3.º Del mismo modo se vendría en conocimiento de la depresión de un líquido en un tubo no mojado por él. En este caso se observaría que el menisco es convexo y que la presión en un punto del líquido situado inmediatamente debajo es superior a la presión atmosférica.

Por otra parte, como el menisco no se conjuga tangencialmente con la pared, su radio de curvatura ya no es igual al radio del tubo, sino que es mayor y depende del ángulo de conjunción.

II. *Formación de las gotas.* — Si hacemos caer lentamente el agua por un añadido vertical de pequeño diámetro (fig. 247), se ve que cada gota se forma y crece poco a poco. El agua se halla contenida en una especie de saco formado por su película superficial que le impide caer. Pero, en cuanto el peso de la gota es suficientemente grande, prodúcese una depresión en su parte superior, y la gota se desprende.

El peso de la gota es proporcional a la tensión superficial del líquido y al diámetro del orificio. — En efecto, sea D este diámetro; las fuerzas que sostienen la gota son las fuerzas de tensión superficial ejercidas sobre la circunferencia πD del orificio. Estas tienen por resultante πDT (T tensión superficial en dinas por cm.); en el momento en que la gota se desprende, tiene, pues, una masa m tal que

$$\pi DT = mg.$$

Se ve, pues, que si se hace salir un mismo líquido por el mismo orificio, todas las gotas tendrán el mismo peso; esta propiedad se utiliza en el *cuentagotas* *. Pero si se hace salir otro líquido las gotas no tendrán el mismo peso.

220. **Aplicación de la capilaridad a la corrección barométrica.** — En los barómetros de tubo delgado, el menisco de mercurio no presenta ninguna región plana. De lo cual resulta que la altura de mercurio por encima del la cubeta es más pequeña que la verdadera altura barométrica.

Puede calcularse la corrección que se debe efectuar, conociendo el radio del tubo y la flecha del menisco, es decir, la distancia del punto más elevado del menisco encima de la línea de conjunción con el tubo (fig. 248). Estos números están consignados en una *tabla de corrección*.

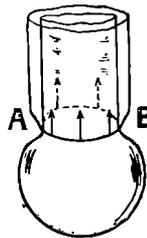


Fig. 247.

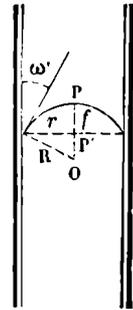


Fig. 248.

* Una gota de agua pura que cae de un orificio de 2 mm. de diámetro pesa 0 gr. 05.

221. Aplicación de la capilaridad a los areómetros. — Errores debidos a la capilaridad.

— Sumergido un areómetro en un líquido que lo moja (fig. 249) éste se eleva en menisco cóncavo alrededor de su vástago y ejerce en toda la circunferencia de conjunción un esfuerzo de tracción debido a la tensión superficial. De modo que esta tracción se agrega al peso del instrumento, para hacerlo hundirse. Por ejemplo, se ha calculado que para un densímetro de 27,220 g. de peso, sumergido en el agua ordinaria, el aumento de peso, debido a la tensión superficial, es igual a 0,235 g. (próximamente $\frac{1}{100}$ del peso total), y que de ahí resulta un exceso de inmersión de 3 mm.

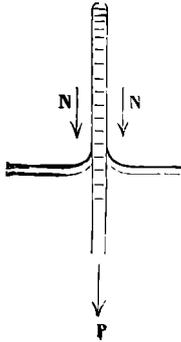


Fig. 249.

En otro líquido donde la tensión superficial fuera inferior a la del agua únicamente en $\frac{1}{3}$, el mismo areómetro subiría 1 mm.

Resulta que no es posible emplear con rigor el mismo areómetro para líquidos diferentes. Por ejemplo, cuando un areómetro sensible es sumergido en el agua y se mantiene allí en equilibrio, basta difundir por la superficie del agua un rastro imperceptible de un cuerpo graso, que se extiende en ella a manera de finísimo velo, para hacer subir al instrumento una cantidad notable, a causa de que disminuye la tensión superficial. Los únicos areómetros perfectamente exactos serán, pues, los de graduación empírica y que no sirven más que para un líquido, hechos con arreglo al modelo del alcoholímetro de Gay-Lussac.

222. Medida de la tensión superficial. — En principio, todos los fenómenos que obedecen a una fórmula que comprenda la tensión superficial y cuyos otros parámetros pueden medirse directamente, pueden servir para determinar T. Claro es que se debe escoger los que se prestan a las medidas precisas y menos numerosas.

Si se trata, por ejemplo, de la ascensión de un líquido de masa específica μ en un tubo de diámetro D en el punto donde se fija el menisco, se tiene :

$$[1] \quad h = \frac{4T}{D\mu g}, \quad \text{de donde} \quad T = \frac{D\mu gh}{4}.$$

Cortando el tubo enfrente del menisco y empleando el microscopio de retículo micrométrico, se mide D, y con el catetómetro se mide h. Después de esto se calcula T empleando la fórmula [1].

Si se trata de la masa m de la gota que se desprende de una sección de diámetro D, se tiene :

$$[2] \quad T = \frac{mg}{\pi D}.$$

De la pesada de n gotas y de la medida de D, permite la fórmula [2] deducir el valor de T.

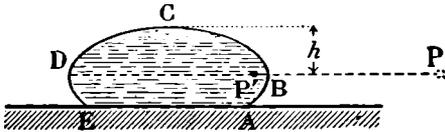


Fig. 250.

Gota ancha. — También se suele emplear con frecuencia el método llamado de la gota ancha, porque ochando una gota de líquido en un plano se extiende quedando comprendida entre dos planos horizontales. Su meridiana presenta la forma reproducida por la fig. 250. En un punto del contorno de la gota hay dos

radios que considerar : R del paralelo de la superficie, que es tanto mayor cuanto más ancha es la gota, y R' de la meridiana que es muy pequeño. De aquí resulta que $\frac{1}{R}$ puede hacerse despreciable con relación a $\frac{1}{R'}$. Un análisis muy sencillo permite calcular cuál es en estas condiciones la distancia h del paralelo de la gota cuyo radio es el mayor (ecuador de la gota) al plano horizontal que limita la gota en su parte superior. De esta manera se tiene :

$$[3] \quad h^2 = \frac{2T}{\mu}, \quad \text{de donde} \quad T = \frac{h^2 \mu}{2},$$

siendo μ la masa específica del líquido. Se mide h en el catetómetro y se calcula T.

La medida de h es difícil. He aquí, el procedimiento indicado por M. Lippmann. Se coloca en P un punto luminoso, poco más o menos en el plano ecuatorial de la gota. El espejo convexo (483) que forma la gota da una imagen P' situada muy cerca de B. Este

es el punto que primero se ve con el catetómetro. Si P no se ha colocado exactamente en el plano ecuatorial, para P' resultará sólo un movimiento vertical insignificante. Para ver bien el punto culminante C, Lippmann coloca sobre la gota un alambre de hierro sumamente delgado, que no deprime su superficie sino en una cantidad menor que 0,01 mm. La segunda visual se dirige a esto alambre.

He aquí algunos valores de T (en dinamias por centímetros).

Mercurio	479.00	Sulfuro de carbono	32.60
Agua	76.50	Esencia de trementina	29.58
Ácido sulfúrico	64.26	Petróleo	26.52
Glicerina	73.44	Alcohol absoluto	25.50
Aceite de oliva	35.70	Éter	18.36

CAPÍTULO II

NOCIONES DE HIDRODINÁMICA. COMPRESIBILIDAD DE LOS LÍQUIDOS

223. Derramamiento de los líquidos. — Principio de Torricelli. —

Cuando un líquido grave está en equilibrio dentro de un vaso (fig. 251), si se hace una abertura en un punto O de la pared, el líquido sale, y al mismo tiempo queda roto el equilibrio de las presiones. La velocidad que tiene cada molécula líquida, en el momento de pasar por el orificio, se determina por el principio siguiente, debido a Torricelli :

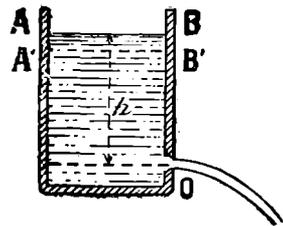


Fig. 251.

La velocidad de un líquido que sale por un pequeño orificio hecho en una pared delgada es igual a la que tomaría un cuerpo que cayese libremente en el vacío desde la superficie libre hasta el centro del orificio.

Llamando V a esta velocidad, h a la altura que tiene el nivel en el instante considerado sobre el centro del orificio, se tiene

$$V = \sqrt{2gh}.$$

Demostración. — Consideremos un intervalo de tiempo infinitamente pequeño, durante el cual una masa m de líquido se ha derramado por el orificio O. Al mismo tiempo, el nivel del líquido ha bajado de AB a A'B'. Por tanto, desde el punto de vista del trabajo de la gravedad, todo ha sucedido como si la masa m del líquido hubiera caído de la altura h. El trabajo de la gravedad es, pues, T = mgh. Por otra parte, si el vaso es ancho con relación a la abertura O, como la velocidad del líquido en el interior del vaso se puede despreciar, el trabajo de la gravedad tiene que transformarse enteramente en la energía cinética de la masa m que ha atravesado el orificio. Luego tendremos :

$$T = mgh = \frac{1}{2}mV^2, \quad \text{de donde} \quad V = \sqrt{2gh}.$$

Forma de la vena líquida. — Conforme a las leyes del movimiento de los proyectiles, cada partícula líquida que atraviesa el orificio O des-

cribe una parábola al caer al suelo. El conjunto de estas trayectorias materiales constituye un volumen parabólico, que es la vena líquida.

Contracción de la vena. — La observación demuestra que la vena líquida es cónica al salir del vaso, y no se vuelve cilíndrica hasta a cierta distancia. La sección del cilindro que sucede al tronco de cono inicial es más pequeña que el orificio (se llama *sección contraída*): es igual a una fracción c del orificio, que se denomina *coeficiente de contracción*. En un mismo líquido, c varía con la forma y la magnitud del orificio, así como también con la carga.

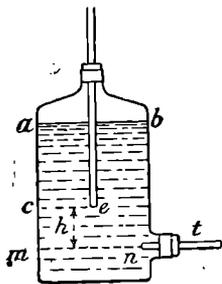


Fig. 252.

224. Vaso de Mariotte. — El vaso (o frasco) de *Mariotte*, es un aparato que se emplea para obtener la salida constante del líquido que contiene.

Compónese simplemente de un frasco bastante grande lleno de líquido, agua por ejemplo, y cerrado por un tapón atravesado por un tubo de vidrio abierto en ambos extremos (fig. 252). En la parte inferior del frasco hay un orificio t por donde se puede vaciar.

Si se abre este orificio, sale el agua y la reemplaza el aire que entra haciendo burbujas por el tubo vertical. Entonces sale el agua con una velocidad constante, que es, según la fórmula de Torricelli, $V = \sqrt{2gh}$, siendo h la diferencia de nivel entre el conducto t y el orificio e del tubo. Esto dura hasta tanto que el nivel del agua en el frasco llegue a estar debajo del orificio e .

En efecto, la salida es producida por la diferencia de presión que existe entre la capa mn y la atmósfera. Y, puesto que la presión atmosférica se verifica en e , esta diferencia de presión es simplemente igual a la presión que ejerce la columna h del líquido.

OBSERVACIÓN. — Puede realizarse este aparato para obtener la salida regular de un gas. En este caso, precisa evidentemente expulsar el gas de su depósito haciendo llegar a éste el agua que cae del frasco de Mariotte.

225. Compresibilidad de los líquidos — Coeficiente de compresibilidad. — Después del experimento de los académicos de Florencia, se consideró mucho tiempo como incompresibles a los líquidos. Cantón hizo ver en 1761 que eran sin embargo compresibles y el hecho fué primero comprobado por Perkins y admitido en adelante. Varios físicos han estudiado esta compresibilidad, primero Oersted, Colladon y Sturm, luego Regnault, Grassi y Cailletet y recientemente Amagat.

Sean V y V' los volúmenes de un líquido bajo las presiones P y P' , la disminución de volumen $V - V'$ puede ser calculada en función del aumento de presión por la ecuación

$$V - V' = KV (P' - P), \quad \text{de donde} \quad K = \frac{1}{V} \frac{V - V'}{P' - P}.$$

K es el *coeficiente de compresibilidad*, entre las presiones P y P' ; esta es la variación media que sufriría la unidad de volumen por un aumento de presión de una unidad.

Si P y P' se acercan mucho, K es el coeficiente de compresibilidad bajo la presión P_1 , término medio entre P y P' .

226. **Piezómetro y experimentos de Ørsted.** — Ørsted estudió la compresibilidad de los líquidos con ayuda del *piezómetro*. Este aparato se compone de un cilindro de vidrio muy grueso (fig. 253), sostenido por su base en una peana de cobre y arriba en una armadura de cobre también. Ésta presenta un embudo de llave R, que sirve para llenarlo de agua, y un cilindro en que se produce la presión mediante un émbolo a que da movimiento el tornillo P. El líquido que se trata de estudiar está contenido en un depósito de vidrio A que termina en un tubo O, encorvado y graduado, que penetra en un baño de mercurio. Cuando se ejerce presión, el mercurio se eleva en el tubo, lo que permite apreciar la disminución de volumen. Junto al depósito A está un tubo vertical B, que lleva al lado una escala; este tubo se llena previamente de aire y penetra también en el mercurio. Durante la compresión este aire se reduce de volumen, el mercurio sube en el tubo e indica de esta manera la presión que se ha obtenido: es una especie de manómetro de aire comprimido.

Contra lo creído por Ørsted, hay que tener en cuenta la variación de volumen del depósito que contiene el líquido: hoy se sabe que se contrae ligeramente.

227. **Leyes de la compresibilidad de los líquidos.** — *Experimentos de Amagat.* — Amagat

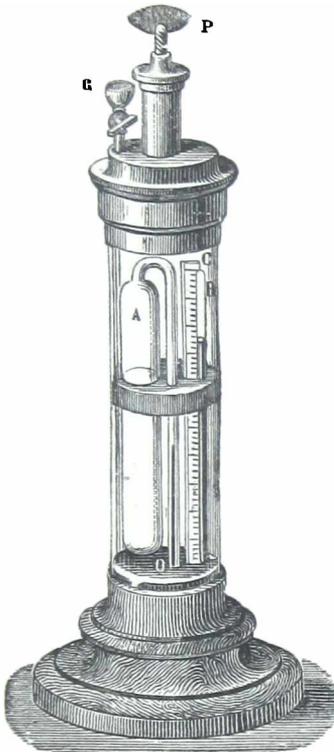


Fig. 253.

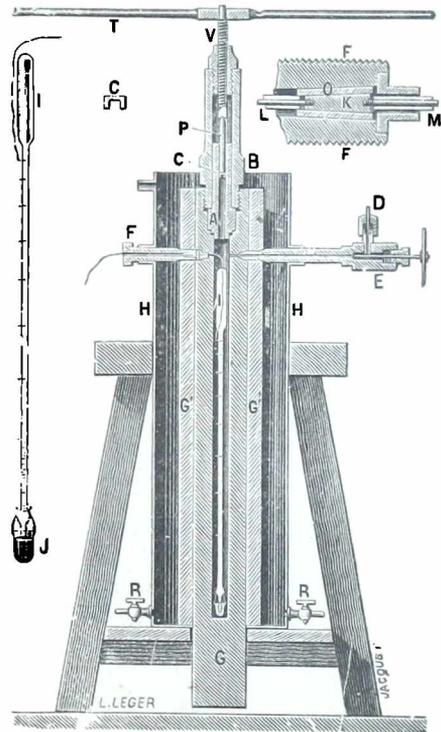


Fig. 254.

estudió la compresibilidad de los líquidos en límites muy extensos de temperatura y de presión.

Aparato. — La figura 254 representa uno de estos aparatos, el que le sirvió para operar entre 0 y 50° y bajo presiones de más de 3 000 atmósferas. Se parece un tanto al de Ørsted. Aquí, el cilindro de vidrio está reemplazado por otro de acero guarnecido con virolas GG' de 18 centímetros de diámetro y 1.20 m. de longitud, colocado en un manguito de vidrio HH, lleno de hielo o atravesado por una corriente de agua a temperatura constante. El líquido que se trata de estudiar está contenido en un piezómetro de vidrio que lleva en su parte inferior un pequeño cilindro lleno de mercurio donde entra y que se sumerge a su vez en el mercurio que hay en el cilindro G'G'. Cuando se produce la presión, el mercurio sube en el vástago y va a tocar sucesivamente una serie de pequeños hilos de platino soldados lateralmente en este vástago y enlazados por medio de un alambre conductor aislado que sale del aparato por la pieza F; la disposición es

tal que un galvanómetro indica exactamente el instante en que el mercurio toca los alambres sucesivos; de esta manera se leen los volúmenes. La presión es originada primero por una bomba que inyecta agua que llega por E; a partir de cierta presión se cierra E y se continúa comprimiendo con el órgano atornillado en la parte superior, y en el cual hay un cilindro de acero P, que impulsado por un tornillo V movido por un cuádruple brazo de palanca T, impulsa delante de sí un casquete de cuero embutido C, que está dibujado aparte.

Las presiones se medían por medio de un manómetro Desgoffes perfeccionado (168) que comunicaba con el cilindro por medio de un añadido, atornillado al nivel de las piezas E y F.

Amagat siguió métodos enteramente distintos para las presiones inferiores y las temperaturas que llegaban a 200°.

Resultados. — 1° *El coeficiente de compresibilidad de los líquidos disminuye regularmente a medida que la presión aumenta; esta disminución se acentúa tanto más cuanto más elevada es la temperatura, y tanto menos cuanto más considerable es la presión.*

2° *El coeficiente de compresibilidad de los líquidos (exceptuando el agua) aumenta regularmente cuando la temperatura sube: este aumento es tanto más rápido cuanto más elevada es la temperatura y tanto menos cuanto más considerable es la presión.*

3° *El volumen del agua a 0° bajo 3000 atmósferas se reduce en $\frac{1}{10}$ de su valor; su densidad con relación al agua a 0° bajo la presión normal es 1,113.*

Observación. — Estos resultados se han corregido en la variación de volumen del vidrio, cuyo coeficiente de compresibilidad es 0,00000 22 según Amagat; por fin, el coeficiente del mercurio, que presenta interés particular, y para el cual se habían obtenido resultados extremadamente distintos, ha sido estudiado especialmente mediante otros métodos, por el mismo físico, que lo encontró igual a 0,0000039.

LIBRO V

CALÓRICO

CAPÍTULO I

TERMOMETRÍA.

228. **Definición del calórico.** — **Temperatura.** — Se llama *calórico* la causa de nuestras sensaciones de *calor* y de *frío*. Se ha convenido en decir que un cuerpo que se calienta *recibe calor* y que lo *pierde* cuando se enfría.

Si dos cuerpos nos dan al tacto la misma sensación de calor, decimos que están a la *misma temperatura*. Si uno de ellos nos parece más caliente que el otro, decimos que *su temperatura es superior*. Pero el tacto no puede darnos más que indicaciones poco precisas acerca de la temperatura; conviene, pues, reemplazar las sensaciones por fenómenos que varíen al mismo tiempo que la temperatura.

229. **Dilatación.** — La mayoría de los cuerpos aumenta de volumen cuando se eleva su temperatura : se dice que *se dilatan*.

I. *Caso de los sólidos.* — La dilatación de los sólidos es pequeña; pero fácilmente se la puede hacer visible ampliándola. Por ejemplo, se toma una varilla AB (fig. 255) y se la fija por uno de sus extremos B, mientras que el otro queda libre y llega a tocar el brazo menor de una palanca AOC, móvil en una escala graduada. Caliéntase la varilla por cualquier procedimiento. A medida que ésta se calienta, descende el extremo C de la aguja. Este movimiento es igual a la dilatación lineal de la varilla, multiplicada por la relación que existe entre los dos brazos de la palanca; por lo tanto, si OC es mucho más grande que OA, la menor prolongación de BA se traducirá por un movimiento sensible de C en la escala. Cuando se deja enfriar la barra, el punto C vuelve a

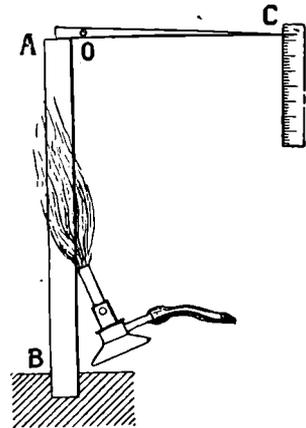


Fig. 255.

su punto de partida, lo que prueba que al volver la barra AB a su primitiva temperatura, ha recuperado su longitud primera.

Al calentarse un cuerpo sólido, todas sus dimensiones aumentan al mismo tiempo. Por esto, si se toma una bola de cobre que pase justamente por un anillo, cuando está fría, no podrá pasar por él si se calienta, a menos de calentar también el anillo. Pero si se calientan a la vez el anillo y la bola, ésta pasará a través del anillo. El diámetro del anillo aumenta, pues, al calentarse.

También se demuestra que el aumento de diámetro es el mismo que si el anillo fuese reemplazado por un disco de la misma substancia. En general, un sólido hueco se dilata del mismo modo que otro macizo de la misma naturaleza y de igual volumen.

II. *Caso de los líquidos.* — Se llena con un líquido coloreado un pequeño matraz de vidrio al cual se suelda un tubo capilar (fig. 256): así que se calienta, el líquido baja de *a* a *b'* y luego sube de *b'* a *b* pasando de su nivel primitivo *a*. Calentándose y dilatándose primero el vidrio del tubo, ha adquirido mayor volumen el vaso que contiene el líquido y por eso ha bajado su nivel; después el líquido se ha calentado a su vez y se ha dilatado mucho más que el recipiente.



Fig. 256.



Fig. 257.

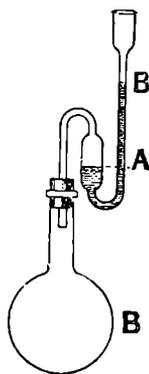


Fig. 258.

y acaba por ser arrojado de él. Si se calienta un gas impidiéndole dilatarse, se aumenta su fuerza elástica. El efecto del calor consiste entonces en un aumento de fuerza elástica del gas calentado. Es fácil medirlo poniendo en comunicación la extremidad del cuello del matraz con una de las ramas de un pequeño manómetro de agua, o de mercurio AB (fig. 258). Si se calienta el matraz, el aire se dilata. Pero si se añade líquido al tubo, lo cual aumenta la presión, se puede volver a su posición primitiva el nivel en A. La desnivelación AB mide entonces el aumento de presión del gas calentado a volumen constante, porque la dilatación del matraz puede ser despreciada.

OBSERVACIÓN. — En estos diversos experimentos, apenas se enfrían los cuerpos, se contraen y así que su estado calorífico ha vuelto a ser el mismo que antes, recobran exactamente, sea su volumen primitivo, sea su fuerza elástica inicial.

230. Medida de las temperaturas. — Principios de termometría. — Hablando con propiedad, la temperatura no es una magnitud *mensurable*, es decir que se la pueda comparar a una magnitud de igual naturaleza tomada como unidad. En efecto, no se concibe una temperatura doble o triple de otra; pero en virtud de ciertas convenciones podemos representar las temperaturas por números. Para esto se ha recurrido a los fenómenos físicos inherentes a las variaciones de temperatura. Se ha observado, por ejemplo, que cuando se calienta un cuerpo *a presión constante*, se dilata; al contrario, si vemos que su volumen aumenta, diremos que su temperatura aumenta. Llamaremos *cuerpo termométrico* o *termómetro* a aquel cuyo volumen pueda definir la temperatura. Los experimentos prueban que si ponemos en contacto dos cuerpos de diferentes temperaturas (es decir que nos *parecen* desigualmente calientes), el más caliente se enfría y el otro se calienta, hasta que ambos tengan la misma temperatura. Por consiguiente, si metemos el cuerpo termométrico en un recinto, sus variaciones de volumen podrán indicar no sólo la temperatura de este cuerpo, sino también la del recinto, que será la misma.

Temperaturas fijas. — Si colocamos el aparato de la figura 256, que puede servir de cuerpo termométrico, en un vaso que contenga hielo mezclado con agua, el nivel será el mismo mientras no se funda el hielo : luego *la temperatura del hielo es constante*.

Del mismo modo, el vapor de un líquido que hierve en una atmósfera en que la *presión* es constante, tiene temperatura fija.

Elección del fenómeno termométrico. — Para evaluar las temperaturas se utiliza, por lo general, la dilatación aparente de un líquido en un vaso de vidrio.

Asimismo, se utiliza la dilatación de los gases en el *termómetro de precisión* (236).

Elección del líquido termométrico. — El mercurio es el líquido termométrico por excelencia porque no entra en ebullición sino a temperatura muy elevada y sólo se congela a una temperatura muy baja, y también porque se pone más pronto que los demás líquidos en equilibrio de temperatura con los cuerpos que le rodean. Esta última propiedad la debe a que es mejor conductor del calor que todos los demás líquidos. Finalmente, exige poco calor para calentarse.

231. Termómetro de mercurio. — Este instrumento se compone de un tubo capilar o *vástago*, de vidrio duro, soldado a un depósito cilíndrico o esférico de la misma substancia (fig. 259). El depósito y parte del tubo están llenos de mercurio. Una escala graduada colocada en el mismo tubo indica los cambios de temperatura y se denomina *escala termométrica*.



Fig. 259.

Manera de llenar el termómetro. — Introdúcese en la ampolla superior C (fig. 260) cierta cantidad de mercurio puro y seco, mayor que la realmente necesaria; después, inclinando un poco el tubo, se calienta el depósito con una lám-

para de alcohol, o bien con carbones incandescentes en unas parillas inclinadas. El aire dilatado sale en parte por el embudo C. Si entonces se deja enfriar el tubo aunque manteniéndolo en posición vertical, el aire que dentro queda se contrae y la presión atmosférica obliga al mercurio a pasar al depósito D, por capilar que el tubo sea. Reitérase la operación hasta que sólo quede en el depósito D escaso volumen de aire. Haciendo hervir entonces el mercurio, se expulsa por medio de los vapores mercuriales cuanto quedaba de aire y de humedad en el tubo y en el depósito.

Una vez aquí se desprende la ampolla superior, dejando en la extremidad correspondiente una punta bien afilada. Luego se calienta el depósito hasta que el líquido dilatado llegue a lo alto del tubo.

Cuando se ha expulsado todo el exceso de mercurio que se introdujo en el instrumento, se rompe a su vez la punta, mientras está llena de mercurio, de modo que no quede rastro de aire en el vértice.

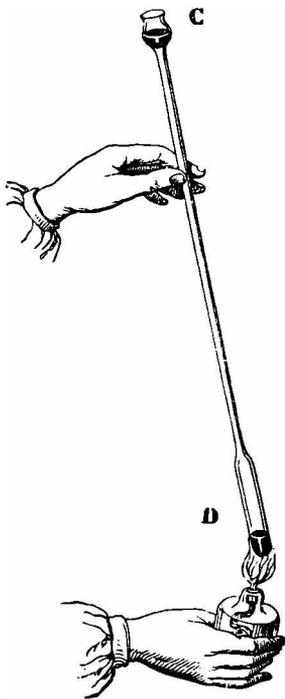


Fig. 260.

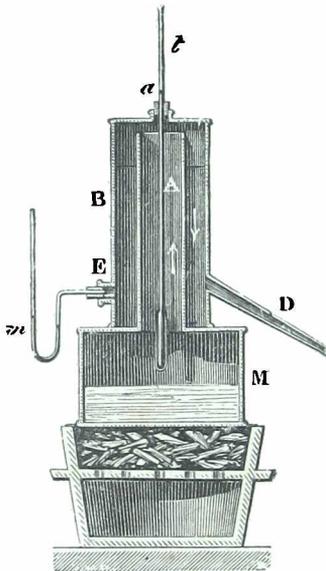


Fig. 261.

Graduación : puntos fijos de la escala. — En la escala llamada centígrada, se conviene en llamar *temperatura de cero grados* (0°) a la temperatura del hielo fundido, y *temperatura de 100 grados* (100°) a la temperatura del vapor de agua en ebullición bajo la presión normal de 76 centímetros de mercurio : estos son los *puntos fijos* de la escala centígrada.

Determinación del punto 100. — Se sumerge el termómetro en vapor de agua hirviendo que procede de una caldera M (fig. 261). Para evitar el enfriamiento de este vapor por el contacto con las paredes del recipiente, se dispone una especie de manga B por donde circula el vapor antes de escaparse por el tubo D. Un pequeño manómetro de agua *m* permite comprobar si el vapor se halla a la presión atmosférica o medir el ligero exceso de presión que pudiera tener. En el punto en que el nivel del mercurio se detiene se marca una rayita *a* : es el punto 100, si la presión del vapor es exactamente 76 cm.

Determinación del cero. — Se introduce el depósito del termómetro en un embudo que contenga hielo, finamente machacado y humedecido

con agua destilada, y se señala el nivel a que se detenga el mercurio : es el punto *cero* (0°).

Construcción de la escala. — Por medio de una máquina de dividir, se divide en 100 partes iguales * el intervalo de 0 a 100; se prolonga la división por encima de los 100 grados y por debajo del grado 0; luego escribense cifras de 10 en 10. Después, las divisiones y los números se graban con ácido fluorhídrico.

Uso del termómetro. — Supongamos que se quiere determinar la temperatura de un baño de agua. Sumérgese en él el termómetro y se lee la división a cuyo lado se detiene el mercurio. Si, por ejemplo, esta división es la 15, diremos que la temperatura del baño es 15 grados (15°).

Para designar las temperaturas inferiores a cero, se las precede del signo — (*menos*); así, 15 grados bajo cero se representa por — 15°.

232. Termómetros de mercurio de precisión. — Desde hace algunos años, la termometría de mercurio ha realizado notables progresos, desde el punto de vista de la precisión. Corrientemente, se mide la temperatura con aproximación de una centésima de grado y puede conseguirse la de una milésima de grado mediante minuciosas precauciones y correcciones escrupulosas.

I. Aparatos para determinar los puntos fijos. — 1° *Punto 100.* — En la oficina de Sèvres, se emplea un aparato perfeccionado. El termómetro T (fig. 262) está colocado en un gran tubo de doble circulación A.

El tubo A está sostenido por otro horizontal B que forma eje, y que penetra en los engarces M₁ y M₂ (fig. 262, a); puede colocársele horizontal o verticalmente : de esta manera es fácil calcular la influencia de los pesos de la columna de mercurio sobre el lugar del grado 100. Su posición está determinada por topes N, con tornillo de regulación; una llave de seguridad F lo mantiene en su posición vertical; un mango de madera sirve para manejarlo. Por la parte del soporte M₁, el tubo B está en comunicación con el tubo interior, donde se encuentra colocado el termómetro; por la parte de M₂, está enlazado solamente con el mango interior.

El vapor desarrollado en la caldera de cobre C llega a M₁, por un tubo de plomo D rodeado de fieltro, y después penetra en lo interior del tubo A, que recorre en toda su longitud, pasa entre las paredes, y sale por M₂. Condénsase en un tubo vertical E, abierto por arriba y envuelto en una circulación de agua fría: el agua condensada vuelve al fondo de la caldera por el tubo K. Un manómetro de agua H indica la diferencia de las presiones interior y exterior o, de otro modo, la presión en el aparato. Las lecturas se efectúan con un pequeño anteojo L fijo en el tubo A. La columna mercurial no debe subir por encima del tapón más que la cantidad estrictamente necesaria para hacer posible la observación. La diferencia de nivel en las dos ramas del manómetro indica el exceso de presión del vapor a la salida de la caldera. Se tendrá la presión total en el aparato añadiendo a la presión, medida en el barómetro, la mitad del exceso, siempre muy pequeño, indicado por el manómetro.

El termómetro debe permanecer expuesto a la temperatura de 100° todo el tiempo que el cambio de lugar del cero es sensible, es decir, desde unos cuantos minutos a una hora próximamente, según la naturaleza de la envoltura.

* Si en la determinación del punto fijo superior, la presión del vapor no es 76 cm., el trazo marcado no corresponde a la temperatura 100°. Pero se ha establecido que, alrededor de los 100°, la temperatura del vapor de agua varía 1° en un cambio de presión de 2,7 centímetros. Por lo tanto, si la presión fuese H cm., diferente de 76 cm., la temperatura del vapor sería $T = 100 + \frac{H - 76}{2,7}$. Se determina la distancia L entre los dos puntos fijos; la longitud del grado es $l = \frac{L}{T}$. Con la máquina de dividir se trazan líneas que disten l, a partir del cero,

2º *Punto cero.* — Se usa una campana hueca de vidrio A (fig. 263), de algunos litros, provista de una llave de escape. Está mantenida verticalmente por un soporte, el cual lleva, además, dos vástagos BB, contra los cuales queda suavemente apretado el termómetro T por un muelle C. Introdúcese en la campana hielo finamente triturado y luego se le añade agua destilada, abriendo, después, la llave para que escurra el exceso de agua.

La masa de hielo debe quedar impregnada de agua.

II. *Cambio de lugar del cero.* — Un termómetro que ha sido calentado conserva, después de enfriarse, un residuo de dilatación y su depósito no vuelve a su primitivo volumen sino muy lentamente.

Al construir el termómetro, se le ha calentado mucho; por eso, el depósito

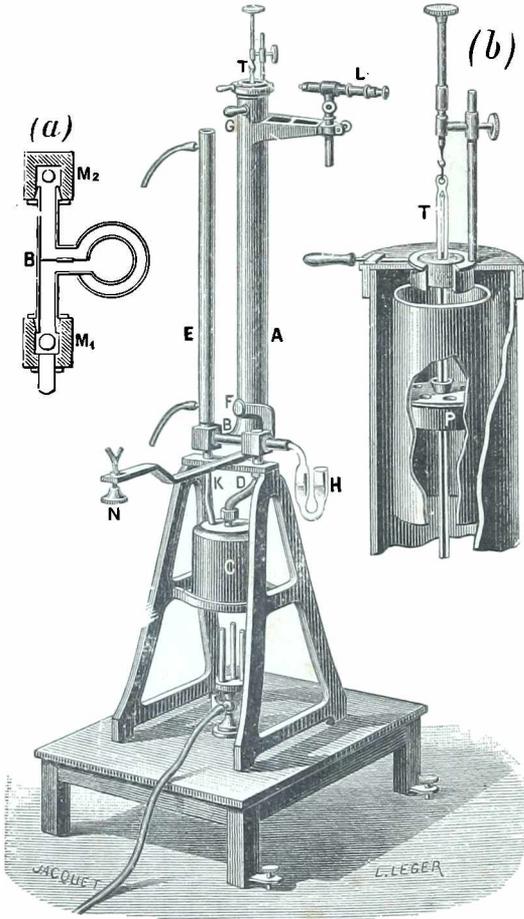


Fig. 262.

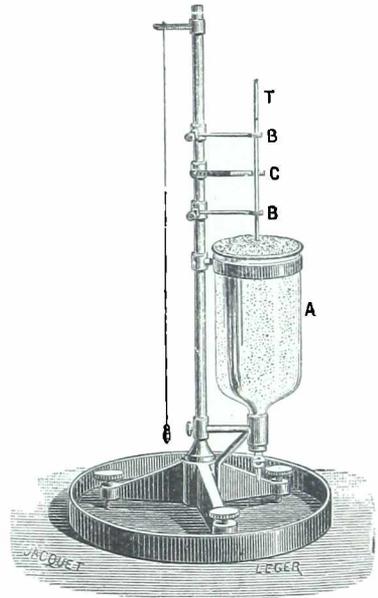


Fig. 263.

ha conservado un fuerte residuo de dilatación. Si la graduación se efectuase en seguida, notaría, sumergiendo de vez en cuando el termómetro en hielo fundido, que el cero sube muy despacio, lo cual indica que desaparece el residuo de dilatación. El recocido disminuye mucho este fenómeno. Esta operación consiste en dejar enfriar el termómetro con suma lentitud, después de haberlo calentado intensamente. Entre la construcción y la graduación conviene dejar un gran intervalo de tiempo.

Además, cuando se utiliza el termómetro, una vez graduado, para determinar una temperatura más elevada que cero y que se toma el cero inmediatamente después, se ve que ha descendido, por causa del residuo de dilatación. Para llegar a medir exactamente una temperatura, a pesar de este fenómeno, se puede, después de notar la indicación t del termómetro, tomar, en seguida, el cero, que se encuentra en una división z . La temperatura medida será $t - z$.

III. *Corrección del calibre.* — La graduación del termómetro no debería ser exacta sino cuando el vástago fuese perfectamente cilíndrico. A las divisiones de igual longitud trazadas con la máquina de dividir, corresponderían entonces grados de igual volumen. Pero, como esto no puede realizarse nunca, conviene efectuar, en cada medida, una corrección que permita determinar el resultado que se hubiera obtenido do ser el vástago cilindro perfecto. Para establecer la tabla de corrección, se cambia de lugar, on

el tubo, una porción de la columna de mercurio separada por un choque, y se determinan las diversas longitudes que ocupa. Se comprende que estas operaciones pueden darnos datos acerca del diámetro del tubo en sus diversos puntos.

IV. *Corrección de presión exterior.* — La presión exterior disminuye ligeramente el volumen del depósito; de modo que cuanto mayor es la presión, más elevada está la división indicada para una misma temperatura. Por consiguiente, hay que verificar también una corrección a la lectura de tal división. Cuando se hace variar la presión en cantidades conocidas, se tienen ya elementos para el estudio de las variaciones de la altura mercurial.

V. *Corrección de presión interior.* — Cuando el mercurio se eleva en el vástago, supuesto vertical, la presión de la columna mercurial determina un aumento de volumen del depósito, y la división en ella leída es muy pequeña. Para ponerse al abrigo contra este fenómeno, convendría proceder a todas las lecturas colocando el termómetro horizontalmente. Pero, como esto no es posible en todos los casos, cuando el termómetro es vertical hay que acompañar a la lectura una corrección llamada de presión interior.

Para efectuar tal corrección se aprovecha la observación verificada ya acerca del punto 100, en posición vertical y horizontal.

233. Diferentes escalas termométricas. — Distingúense tres principales: la *escala centígrada*, la *escala de Réaumur* y la *escala Fahrenheit*.

1º *Escala centígrada.* — La escala centígrada es la que acabamos de construir; casi todos los países la emplean. Fué imaginada por el físico sueco Celsius. De modo que el *grado centígrado* debe definirse de este modo: la variación de temperatura correspondiente a la *centésima parte* de la dilatación aparente que sufre el mercurio en el termómetro, entre la temperatura del hielo fundente y la del vapor de agua hirviendo bajo la presión de 76 cm.

2º *Escala Réaumur.* — El físico francés Réaumur propuso, en 1731, los mismos puntos fijos; pero dividió su intervalo en 80º.

De modo que 80º Réaumur equivalen a 100º centígrados: de ahí resulta que 1º R equivale a $\frac{5}{4}$ de grado C.

3º *Escala Fahrenheit.* — Fahrenheit propuso en 1714 una escala cuyo uso se ha extendido después por Holanda, Inglaterra y América del Norte. El punto fijo superior de esta escala corresponde también a la temperatura del agua hirviendo; mas el cero corresponde a la temperatura que se obtiene mezclando pesos iguales de sal amoníaco machacada y de nieve: el intervalo de los dos puntos fijos se divide en 212º.

El termómetro F marca en el hielo fundente 32º; por consiguiente, 100º C equivalen a 180º F y 1º C equivale a $\frac{9}{5}$ del grado F.

234. Sensibilidad de los termómetros. — **Termómetros de escala fraccionada.** — La sensibilidad de un termómetro puede considerarse desde dos puntos de vista. En efecto, un termómetro es *sensible*: bien cuando acusa pequeñísimas variaciones de temperatura; bien cuando se pone rápidamente en equilibrio de temperatura con los cuerpos ambientes.

Obtiénese el primer género de sensibilidad dando al termómetro un vástago muy capilar, soldado a un depósito algo grueso. En estos termómetros el grado ocupa gran longitud. En este caso, no hay medio de construir tales instrumentos que posean la escala completa de 0º a 100º. Entonces, empléanse series de termómetros, cada uno de los cuales

comprende parte de la escala. Tales son los termómetros representados en las figuras 264 y 265. El primero está graduado de 0° a 50°; el segundo, de 50° a 100°. Para que, no obstante, puedan comprobarse los puntos fijos, se ha soplado en el tubo una ampollita que, en el

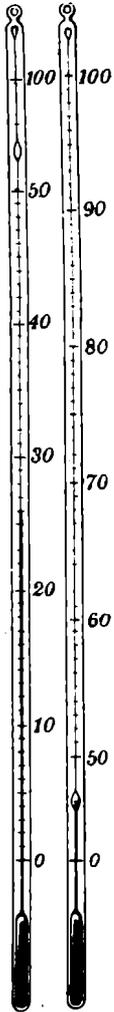


Fig. 264 y 265.

primero, está colocada entre 50 y 100 y absorbe la mayor parte de la dilatación entre estas temperaturas. En el segundo, la ampolla se encuentra entre las divisiones 0 y 50. Empléanse corrientemente termómetros divididos en cincuentésimas de grado: se ve el cuarto de división con un cristal de aumento, y así se tienen las dos centésimas de grado. También se ha llegado a construir termómetros divididos en dos centésimas de grado, que dan, vistos con un cristal de aumento, la milésima de grado, con tal de hacer minuciosas correcciones. (232).

El segundo género de sensibilidad se realiza dando al termómetro un depósito muy pequeño.

235. Comparación de los termómetros de mercurio. — Como la posición del nivel del mercurio depende a la vez de la dilatación del metal y de la del vidrio, se prevé que dos termómetros contruidos con vidrios de distinta naturaleza no indicarán la misma temperatura en un baño cualquiera. Esto lo demuestran los experimentos. Todos los termómetros indican igualmente 0° y 100°, por efecto de su graduación. Entre 0° y 100°, las diferencias que presentan son muy pequeñas; pero, más allá de 100°, la diferencia puede alcanzar varios grados. Se dice que estos termómetros no son *comparables*.

A este defecto, hay que añadir el de que la escala de temperaturas entre las cuales puede funcionar un termómetro de mercurio es bastante reducida, porque se halla limitada entre el punto de solidificación (— 40° próximamente) y el de ebullición (+ 350°) del mercurio.

236. Termómetros de gas. — Termómetro normal. — Los gases pueden servir igualmente de cuerpos termométricos. Podría utilizarse la variación de volumen a presión constante; pero esta variación es tan grande que no se podría mantener, a cualquier temperatura, la masa de gas en el recinto cuya temperatura se busca. Por esta razón, es preferible operar a *volumen constante*; pues las variaciones de temperatura producen entonces variaciones de *presión*.

Los gases pueden servir para un número considerable de temperaturas. Así, el hidrógeno, que sirve de cuerpo termométrico *normal*, no puede liquidarse a temperatura superior a — 200°. La temperatura más elevada sólo reconoce límites en la fusión de los recipientes; es la del reblandecimiento de la porcelana, unos 1 800° grados.

Además, por ser los gases mucho más dilatables que los sólidos, la influencia de la materia del recipiente es despreciable, y todos los

termómetros son comparables entre sí, sea cual fuere la naturaleza del recipiente, con tal que contengan el mismo gas.

Principio del termómetro de gas. — Se toma una masa de hidrógeno a la temperatura del hielo fundido (0°) a la presión de un metro de mercurio. Conducesela a la temperatura del vapor de agua, que hierve a la presión atmosférica normal, conservando constante su volumen. Entonces, adquiere una presión que los experimentos han demostrado ser igual a 136 cm. 62. En un intervalo de 100 grados, la presión ha variado 36 cm. 62.

Grado centígrado. — Se denomina grado centígrado la variación de temperatura que produce un cambio de presión de la masa de hidrógeno, mantenida a volumen constante, igual a la centésima parte de la variación de la presión sufrida entre 0° y 100° o sea 0 cm. 3662.

Llamemos, en general, p_0 a la presión del hidrógeno a 0° , y p_{100} a su presión a 100° .

Para determinar la temperatura de un baño se busca la presión p que en él recibe la masa de hidrógeno mantenida a volumen constante.

La variación de presión entre 0° y la temperatura desconocida t es $p - p_0$.

Por otra parte, la variación de presión que corresponde a 1° es

$$\frac{p_{100} - p_0}{100}.$$

Luego

$$[1] \quad t = (p - p_0) : \frac{p_{100} - p_0}{100}.$$

La magnitud $\frac{p_{100} - p_0}{100 p_0} = c$ recibe el nombre de *coeficiente termométrico*. Este coeficiente es igual a 0,003662.

Tenemos $t = \frac{p - p_0}{cp_0}$, de donde $p = p_0(1 + ct)$.

Cero absoluto. — Se llama *cero absoluto* la temperatura a que se anularía la presión del hidrógeno, mantenido a volumen constante suponiendo que conserve el estado gaseoso hasta esa temperatura. Según lo que precede, se ve que para obtener la temperatura del cero absoluto en la escala del termómetro de hidrógeno, basta hacer a $p = 0$ en la ecuación [1], y tendremos :

$$t = - \frac{100p_0}{p_{100} - p_0}.$$

O bien, reemplazando a p_0 por 100 y a $p_{100} - p_0$ por 36,62,

$$t = - 273^{\circ}$$

Aunque a primera vista parece que esta temperatura no es excesivamente baja, se puede demostrar que es tan imposible realizarla como obtener una temperatura sumamente elevada.

Temperatura absoluta. — Llámase *temperatura absoluta* la temperatura contada sobre el cero absoluto. Por consiguiente si t es la temperatura de un cuerpo en la escala normal del termómetro de hidrógeno, su temperatura absoluta será

$$T = t + 273.$$

237. **Termómetro normal de Sèvres.** — El termómetro normal de Chappuis, instalado en la Oficina internacional de pesas y medidas, en Sèvres, es un *termómetro de hidrógeno*.

El hidrógeno se halla contenido en un depósito de platino o de porcelana H (fig. 266) que comunica, por un tubo delgado t , con la rama cerrada de un manómetro de aire libre MN. La rama abierta forma la cubeta de un barómetro B; de suerte que la presión del gas se obtiene determinando (con el comparador) la diferencia de nivel AB. Como la rama N comunica con una cubeta C separada por la rama A, la diferencia de nivel CB nos dará la altura barométrica. Para mantener constante el volumen del gas, se eleva más o menos un depósito R que contiene mercurio y comunica con N por un tubo de caucho. De este modo, el nivel A adquiere siempre la misma posición.

Si el depósito no fuese dilatante, el volumen del hidrógeno se mantendría constante; pero, como el volumen del depósito varía un poco con la temperatura, hay que hacer una corrección, la cual requiere el conocimiento del coeficiente de dilatación cúbica (245) del depósito.

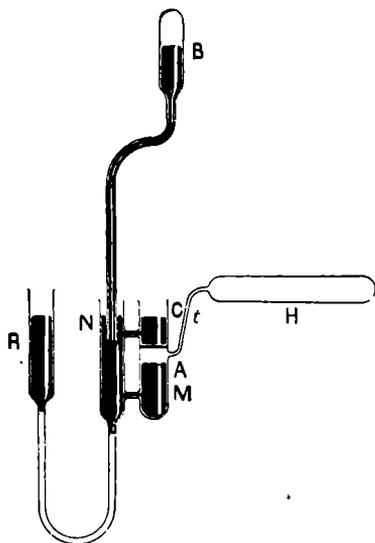


Fig. 266.

Comparación del termómetro normal y del termómetro de mercurio. — El termómetro de gas exige operaciones muy largas. Además, en muchos casos, sus dimensiones imposibilitan su empleo; por lo cual, los termómetros de mercurio son los aparatos prácticos. Pero conviene comparar cada uno de ellos con el termómetro normal colocado en las mismas condiciones. En los termómetros de mercurio de vidrio *duro*, la diferencia es nula a 0° y a 100° ; a 40° , alcanza un valor aproximado de $1/10$ de grado y de 3° , a los 300° .

238. Medida de temperaturas muy bajas. — **Termómetros de alcohol.** — El termómetro de mercurio no sirve para medir temperaturas inferiores a -40° .

Para éstas se ha empleado mucho tiempo el termómetro de alcohol; pero el alcohol se congela también a -140° .

Además, ofrece el inconveniente de volverse espiritoso muy por encima de esta temperatura; por estas razones, en la actualidad, se usan principalmente termómetros de éter de petróleo (hasta a -220°). Puede emplearse el termómetro de hidrógeno para temperaturas muy bajas, porque no se liquida sino a -252° bajo la presión atmosférica. Pero es preferible reemplazar el hidrógeno por el helio, que no se liquida sino a -270° bajo la presión atmosférica.

Termómetro de alcohol. — El termómetro de alcohol se usa también como aparato tosco a causa de su precio poco elevado. Generalmente, se le llena de alcohol colorado de rojo.

El cero se toma en el hielo fundido, como en el termómetro de mercurio; luego, se gradúa por comparación con un termómetro de mercurio tomando por límite superior de la escala 60° o 70° .

239. Termómetros de máxima y de mínima. — A veces, es necesario, especialmente en meteorología, saber la temperatura más elevada y la más baja que haya marcado un termómetro. Para conseguirlo, se emplean termómetros de máxima y de mínima.

Termómetro de Six y Bellani. — Indica a la vez temperatura máxima y la mínima. Compónese de un termómetro de alcohol cuyo depósito está en A (fig. 267); el vástago que es encorvado, contiene en contacto con el alcohol, una columna de mercurio. Cuando la temperatura varía, la dilatación o la contracción del alcohol imprimen un cambio de lugar al mercurio; una doble graduación indica la temperatura por los extremos de la columna mercurial. Dos índices de esmalte, que frotan ligeramente contra el vidrio, son, en primer lugar, conducidos a ambos extremos de la columna mercurial. Para esto, se mueven los índices en los tubos, por medio de un imán que atrae un trocito de hierro colocado en cada uno de ellos. Cuando la temperatura sube, el mercurio abandona el índice t' , que queda suspendido, y empuja al índice t ; inversamente, cuando baja la temperatura, queda abandonado el índice t y es empujado el t' . El extremo inferior de t indica, pues, la temperatura máxima y el de t' , la mínima. Para operar

en otro período de tiempo, se vuelven a poner los índices en contacto con el mercurio.

Termómetros médicos. — Son pequeños termómetros (fig. 268) graduados en décimas de grado en el espacio de 34° a 45° y que sirven para tomar la temperatura del cuerpo del enfermo. Como la lectura no puede hacerse sino después de retirar el termómetro, es preciso que la columna mercurial no pueda retroceder. Por eso el nacimiento del vástago tiene una abolladura que entorpece el movimiento del mercurio. Cuando la temperatura sube, el mercurio asciende por el vástago; pero, al bajar aquélla, la columna de mercurio se corta al nivel de la abolladura y queda suspendida en el tubo.

240. *Termómetros registradores.* — El termómetro registrador de Richard (fig. 269) permite notar sucesivamente las temperaturas sin tener que notar observando continuamente el termómetro. Consta de una especie de caja metálica D, de sección ovalada, cerrada y completamente llena de petróleo. Como este líquido es mucho más dilatante que su envoltura, al aumentar la temperatura, ejerce sobre el tubo una presión que tiende a disminuir la curvatura de éste. Los ligeros movimientos de la caja, ampliados por una palanca, son transmitidos a una pluma *a* que se mueve contra la superficie de un tambor giratorio, completamente análogo al de los barómetros registradores del mismo constructor (162).

241. *Aparatos termométricos para la medida de diferencias muy pequeñas de temperatura.* — Varios fenómenos que dependen de la temperatura se han aplicado para medir ésta en los casos en que no son utilizables los termómetros ordinarios; pero las indicaciones de los diversos aparatos que vamos a describir deben ser comparadas con las del termómetro normal.

1° *Pares termoeléctricos.* — *Aguja termoeléctrica.* — Ya veremos (756), que si se constituye un circuito eléctrico con dos hilos de metales diferentes soldados en dos puntos,

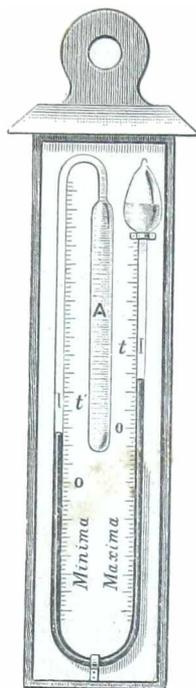


Fig. 267.



Fig. 268.

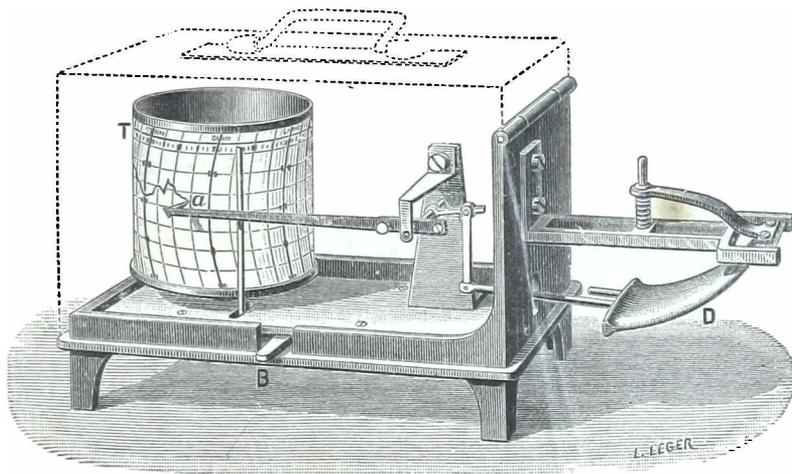


Fig. 269.

y si se intercala un galvanómetro en el circuito, éste indica una corriente eléctrica en cuanto se produce una diferencia de temperatura entre las dos soldaduras.

En la *aguja termoeléctrica* de Becquerel, los dos metales, hierro y cobre, por ejemplo,

están soldados en A y A' (fig. 270). Se coloca A en el punto cuya temperatura se quiere medir, y A' en un baño cuya temperatura se hace variar hasta que el galvanómetro G no se desvíe. En este caso, A y A' se hallarán a la misma temperatura, que se mide por un termómetro *t* colocado en el baño. El interés de este mecanismo reside en la pequeñez de A que puede introducirse en sitios donde nunca podría entrar el depósito del termómetro de mercurio.

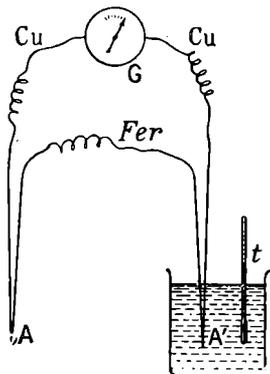


Fig. 270.

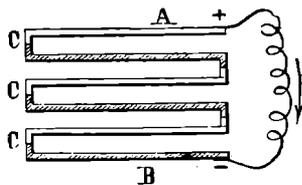


Fig. 271.

2º *Pilas termoelectricas.* — En estas pilas, se emplean varios pares termoelectricos reunidos en serie, lo cual aumenta la intensidad de la corriente termoelectrica.

Tal es pila termoelectrica de Nobili y Melloni. Está constituida por una serie de pares bismuto-antimonio.

Se disponen los pares de modo que todas las soldaduras de orden impar se encuentren sobre una misma cara, y las de orden par sobre la opuesta (fig. 271 y 272). Hay dos bornes *m*, *n* que comunican, uno con el primer antimonio, y el otro, con el último bismuto;

estos son los dos polos de la pila. Se los une a un galvanómetro que se desvía en cuanto se produce cualquier diferencia de temperatura, por pequeña que sea, entre las dos caras de la pila. Para proteger las dos caras de la pila contra la radiación ambiente, se fijan dos estuches rectangulares BA que pueden ser cerrados por pantallas EE'.

3º *Radiomicrometro.* — Este aparato, inventado por Arsonval, ha sido perfeccionado por Vernon Boys. Se compone de un pe-

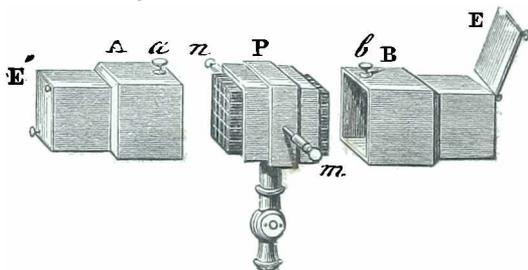


Fig. 272.

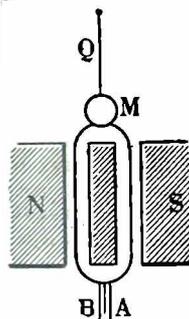


Fig. 273.

queño par bismuto-antimonio BA (fig. 273) cerrado por un alambre de cobre colocado en el campo de atracción de un imán poderoso NS y suspendido de un alambre de cuarzo Q. Es, pues, la combinación de un par termoelectrico y de un galvanómetro de corriente móvil (814). Basta elevar una millonésima de grado la temperatura de la soldadura bismuto-antimonio para producir una rotación del sistema. Para apreciar esta rotación, el alambre de cobre va provisto de un pequeño espejo (480).

4º *Bolómetro.* — Es un termómetro fundado en el aumento que sufre la resistencia eléctrica (763) de una pequeña cinta de platino cuando sube su temperatura. Para apreciar este aumento, se emplea el mecanismo del puente de Wheatstone. El bolómetro se debe a Swangberg. Langley lo ha convertido en un aparato que puede apreciar una variación de temperatura de una millonésima de grado.

242. **Pirometría.** — La pirometría es el conjunto de métodos para la medición de temperaturas elevadas, y los *pirómetros* son los aparatos destinados a efectuarla.

1º El único *pirómetro* de precisión es el termómetro de gas; pero no puede emplearse para temperaturas superiores a 1 800º. Para estas altas temperaturas, es mejor reemplazar el hidrógeno por el nitrógeno, por-

que el hidrógeno pone incandescente la envoltura de platino iridiado empleada casi siempre..

Por otra parte, el empleo de este termómetro es muy delicado: su manipulación exige gran habilidad y el volumen de su depósito impide que pueda aplicarse a medidas industriales.

2º *Pirómetro de cuadrante de Richard.* — Para medidas de poca precisión, puede usarse el *pirómetro de cuadrante de Richard*. Se compone de un depósito de hierro que contiene nitrógeno y comunica, por un tubo filiforme, con el tubo de un aparato análogo al manómetro de Bourdon (169). Este aparato no sirve para temperaturas superiores a 500°. Se lo gradúa calculando, por la fórmula de dilatación de los gases (256), cuál es, en cada presión, la temperatura correspondiente, e inscribiendo esta temperatura en el cuadrante. Este aparato se ha transformado fácilmente en pirómetro registrador, poniendo el depósito de nitrógeno en comunicación con el tubo de un manómetro registrador que está graduado en grados.

3º *Método calorimétrico de Violle.* — Violle propuso un método termométrico indirecto, que es un método de calorimetría (270), y le ha permitido, entre otros resultados importantes, establecer los *puntos de fusión*, con arreglo al termómetro normal, de diferentes metales. Halló, para la plata, 954°; el oro, 1 035°; cobre, 1 054°; paladio, 1 500°; platino, 1 775°; iridio, 1 950°.

Esta escala de puntos de fusión constituye la base de la pirometría actual; puesto que tales puntos se sustituyen a las indicaciones del termómetro normal en la graduación de varios pirómetros.

4º *Pirómetro eléctrico de H. Le Chatelier.* — M. H. Le Chatelier ha utilizado los fenómenos termo-eléctricos y ha adoptado pares de soldadura autógena, formados de platino y de sus aleaciones, graduándolos por medio de los puntos de fusión de Violle. La intensidad de las corrientes termo-eléctricas producidas se mide con un galvanómetro de Arsonval (814). La duración de la observación varía de 1 a 10 segundos.

M. H. Le Chatelier ha determinado, valiéndose de este aparato, gran número de temperaturas industriales muy importantes, encontrando números generalmente inferiores a los que antes se admitían: por ejemplo, 1 370° en vez de 1 800° para la cocción de la porcelana dura.

5º *Pirómetro óptico de H. Le Chatelier.* — El principio de este aparato consiste en comparar por un método fotométrico (466) la intensidad de las radiaciones emitidas por el cuerpo cuya temperatura se quiere medir, con las radiaciones del mismo color emitidas por una lámpara tipo.

Se tamiza la radiación emitida por el cuerpo que se estudia, mediante un cristal rojo, y se compara la radiación roja obtenida de este modo con la radiación roja de una lámpara de petróleo. Para efectuar tal comparación, úsase, en el pirómetro óptico de Le Chatelier, el mecanismo del fotómetro de Cornu (466).

6º *Métodos de Féry.* — Féry ha aplicado las leyes de la radiación a la medida de altas temperaturas de los hornos industriales. Emplea dos métodos.

El primero consiste en evaluar la energía total de la radiación. Para esto, proyéctase, por medio de una lente de fluorina o de un espejo cóncavo plateado, la imagen de una abertura del horno sobre un par termoelectrónico colocado en el circuito de un galvanómetro. El aparato se gradúa por medio de temperaturas ya conocidas, luego, por temperaturas más elevadas, aplicando la ley de Stefan (619).

El segundo método, más práctico, puesto que no exige galvanómetro, aplica el aumento que con la temperatura sufre la intensidad de la radiación particular emitida por el cuerpo caliente. Se mira la abertura del horno, a través de una lente monocromática y una lámina absorbente cuyo espesor se puede variar como se quiera. Se compara el resplandor

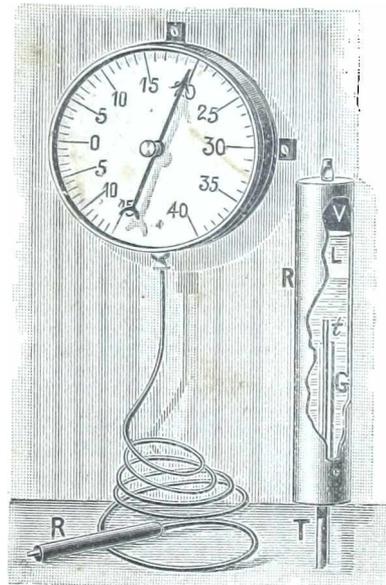


Fig. 274.

con el de una lámpara tipo y se varía el espesor de la lámina absorbente de manera a comprobar la igualdad de los resplandores. La temperatura se deduce del espesor de la lámina.

243. **Termómetros de tensión de vapor saturado, de José Fournier.** 1º. *Termómetro de cuadrante.* — El aparato (fig. 271) consiste en un tubo de manómetro Bourdon que contiene un líquido lo menos volátil que sea posible. Un tubo T delgado y flexible de cobre, de cualquier longitud, y que contiene el mismo líquido, va a parar al centro de otro tubo más ancho R, que constituye el depósito termométrico. Está lleno, hasta algo más de su mitad, del líquido precedente G, de modo que el orificio del tubo flexible continúe desembocando en este líquido, cualquiera que sea la posición que se comunique a R. Encima se encuentra un líquido volátil L (amoníaco, anhídrido carbónico, bencina, etc.), variable según los límites de las temperaturas entre las que debe emplearse el aparato.

El vapor V de este líquido ejerce su presión máxima que se transmite al tubo manométrico. Este produce el movimiento de una aguja en una esfera que se gradúa en grados por comparación con un termómetro ordinario.

2º. *Termómetro registrador.* — También, y fácilmente, se construyen termómetros registradores con un mecanismo análogo al del manómetro registrador que ya hemos descrito (170).

Los termómetros de Fournier ofrecen las ventajas siguientes :

El depósito del termómetro puede colocarse en cualquier posición. Puede deformarse sin inconveniente; puesto que la presión del vapor saturante es independiente del volumen que se le dé (284). En fin, como el tubo de comunicación es susceptible de tener una longitud tan grande como se quiera, se puede, con este aparato, tomar la temperatura de un lugar lejano.

La temperatura del mismo tubo de comunicación es también indiferente. Entre el depósito termométrico y el tubo manométrico, puede atravesar regiones en que la temperatura sea alta o baja, constante o variable; el aparato sólo indicará la temperatura del lugar en que se halle su depósito.

CAPÍTULO II

DILATACIÓN DE LOS SÓLIDOS Y LÍQUIDOS

DILATACIÓN DE LOS SÓLIDOS

244. **Dilatación lineal. Estudio experimental.** — *Definición.* — Se llama *dilatación lineal* de un cuerpo sólido entre 0° y t° al aumento que sufre la *unidad de longitud* de una barra de este cuerpo, cuando su temperatura pasa de 0° a t° .

Determinación. — Para determinarla, mídese la longitud de una barra de la sustancia estudiada, a diversas temperaturas. Como la dilatación es muy pequeña, se debe hacer uso de aparatos muy precisos; actualmente, se emplea el *comparador* (21).

Empiézase por colocar debajo de los microscopios MM' (fig. 18 y 275), un metro tipo instalado en una urna rodeada de hielo derretido. Entonces, la distancia de las divisiones *a* y *b* es exactamente un metro.

Sustitúyese el metro tipo por la regla cuya dilatación se quiere estudiar y sobre la cual se han grabado dos trazos a una distancia tan próxima como sea posible de 1 metro. La urna que contiene esta regla

está rodeada también de hielo fundido. Su temperatura es, pues, 0° . Los oculares micrométricos permiten medir exactamente la longitud L_0 de la barra a 0° .

Se vuelven a empezar las mismas operaciones haciendo circular por la urna que contiene la regla estudiada, agua, a la temperatura constante de t° , temperatura que se mide por termómetros colocados a lo largo de la barra. De este modo, se mide la longitud L de la barra a t° .

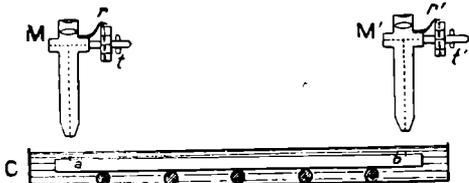


Fig. 275.

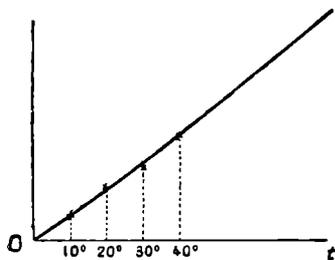


Fig. 276.

Repítase la misma medida a temperaturas t que vayan aumentando regularmente.

El aumento de longitud de la barra, de 0° a t° , es $L - L_0$, y la dilatación será, evidentemente, $A_t = \frac{L - L_0}{L_0}$.

Resultados. — Hemos hallado que la dilatación lineal de una barra de 0° a t° es *poco más o menos proporcional a t* .

Curva de dilatación. — Este fenómeno se evidencia por la construcción del gráfico o *diagrama* de experimentos. Sobre una línea horizontal, se toman longitudes (*abscisas*) proporcionales a las temperaturas sucesivas, y, en perpendiculares, longitudes (*ordenadas*) proporcionales a las correspondientes dilataciones : de este modo, se obtiene una serie de puntos (fig. 276) que representan los experimentos. Se trata de unir estos por un trazo continuo. Generalmente, no se hallan situados en una curva absolutamente regular, a causa de los errores del experimento. En este caso, trázase una curva continua, dejando, si es necesario, ciertos puntos fuera de ella. Esta curva representa, mejor que los números experimentales, la marcha del fenómeno.

Se ha comprobado que la línea obtenida es casi una recta, con muy poca curvatura, y cuya convexidad se halla hacia el lado del eje de las temperaturas $0t$. Esto demuestra que la dilatación es casi proporcional a la temperatura; pero que, no obstante, aumenta algo más de lo que la proporcionalidad indica.

Coefficiente de dilatación lineal. — Se llama *coeficiente de dilatación lineal* de una sustancia a la *prolongación que sufre una longitud de 1 centímetro a 0° , en una elevación de temperatura de 1°* .

Este coeficiente se obtiene haciendo el cociente, por t , de la dilatación Δ_t medida entre 0° y t° . Según lo que precede, cuando la temperatura varía dicho coeficiente permanece casi invariable.

He aquí algunos coeficientes de dilatación lineal :

Acero templado.	0,000013	}	Latón	0,000018
Hierro	0,000012		Cobre	0,000017
Aluminio.	0,000022		Platino.	0,000009
Plata.	0,000019		Vidrio	0,000009

245. Dilatación cúbica. — Se llama *dilatación cúbica* de una sustancia, entre 0° y t° , la variación de volumen que sufre 1 centímetro cúbico de esta sustancia, tomado a 0° , cuando su temperatura se eleva a t° .

La dilatación cúbica K_t es numéricamente igual al triplo de la dilatación lineal Λ_t .

En efecto, sea un cubo que tiene la unidad de longitud por arista a 0° ; su volumen es 1 a esta temperatura; a t° su arista ha pasado a ser $1 + \Lambda_t$ y su volumen $(1 + \Lambda_t)^3$: su dilatación es

$$K_t = (1 + \Lambda_t)^3 - 1 = 3\Lambda_t + 3\Lambda_t^2 + \Lambda_t^3.$$

Como Λ_t es siempre muy pequeño, se deben suprimir los términos en Λ_t^2 y Λ_t^3 , porque son inferiores a los errores de experiencias cometidos en Λ_t : luego

$$K_t = 3\Lambda_t.$$

OBSERVACIÓN. — Esta demostración se aplica únicamente a los cuerpos que se dilatan permaneciendo *semejantes a sí mismos*. Pero esto no ocurre más que para los *cuerpos amorfos* y para los *cristalizados en el sistema cúbico*; todos los demás se deforman más o menos por la dilatación.

Coficiente de dilatación cúbica. — Se llama *coeficiente de dilatación cúbica* de una sustancia, la *variación de volumen de 1 centímetro cúbico de esta sustancia, tomado a 0° , para una elevación de temperatura de 1°* .

El coeficiente de dilatación cúbica de un cuerpo es el triplo de su coeficiente de dilatación lineal. La medida del coeficiente de dilatación lineal da también, por tanto, el coeficiente de dilatación cúbica.

Variación de la densidad de un cuerpo con la temperatura. — Cuando la temperatura de un cuerpo se eleva, su volumen aumenta sin que cambie su masa. De aquí resulta que la densidad del cuerpo disminuye.

246. Uso de los coeficientes de dilatación. — Sea l_0 la longitud de una barra a 0° y λ , su coeficiente de dilatación lineal; a t° la longitud aumentará en $l_0\lambda t = l_0\lambda t$; por lo tanto, se convierte en

$$[1] \quad l = l_0 + l_0\lambda t, \quad \text{o} \quad l = l_0(1 + \lambda t).$$

Del mismo modo, sean V_0 el volumen de un cuerpo a 0° y K su coeficiente de dilatación cúbica; el volumen V_t a t° será :

$$[2] \quad V_t = V_0(1 + Kt).$$

Al mismo tiempo, $K = 3\lambda$.

Sean, finalmente, d_0 la masa específica del cuerpo a 0° , d_t la misma cantidad a t°

La masa del cuerpo es $V_0d_0 = V_t d_t$.

Luego :

$$[3] \quad d_t = d_0 \frac{V_0}{V_t}; \quad \text{de donde} \quad d_t = \frac{d_0}{1 + Kt}.$$

Coefficientes medios de dilatación. — Si la temperatura se eleva en exceso, la dilatación no se puede considerar como exactamente proporcional al aumento de temperatura.

Llamemos Δ_t a la dilatación lineal entre 0° y t . El cociente $\frac{\Delta_t}{t} = \lambda$ se denomina *coeficiente medio* de dilatación lineal entre 0° y t° , y es el que se debe emplear en la fórmula [1].

Asimismo, en la fórmula [2] y [3] debe introducirse un *coeficiente medio de dilatación cúbica*, que es triple del coeficiente medio de dilatación lineal.

247. *Dilatación de los cristales.* — *Dilatómetro de Fizeau.* — Mitscherlich descubrió en 1823 que la mayor parte de los cuerpos sólidos cristalizados tiene una dilatación irregular. Fizeau lo estudió más tarde empleando un método muy delicado.

Consiste esencialmente en producir anillos de Newton (669) por la superposición de un plano de vidrio y de una lámina delgada del cristal que se trata de estudiar, y en observar después el movimiento de los anillos que ocurre cuando se eleva la temperatura del cristal*. De este movimiento se deducen con gran precisión las dilataciones sufridas por la lámina en un sentido perpendicular a sus caras.

Los principales resultados son los siguientes:

I. *Sistema cúbico* (ejemplos: *sal gema, ahumbré*). *La dilatación es la misma en todas direcciones.*

No hay, pues, más que un coeficiente único de dilatación, λ , que es igual a la tercera parte del coeficiente cúbico. De manera que los cristales de este sistema se dilatan de la misma manera que los cuerpos amorfos.

II. *Sistema cuadrático* (ejemplos: *circón o silicato de circonio, ferrocianuro de potasio*).

III. *Sistema romboédrico* (ejemplo: *cuarzo*).

Los sistemas II y III presentan la misma anomalía en su dilatación: tienen dos coeficientes de dilatación lineal, uno λ' , según el eje principal, y otro λ , según cualquier otra dirección perpendicular al eje.

De ahí resulta que el coeficiente cúbico K está dado por la ecuación $K = \lambda + 2\lambda'$.

IV. *Sistema ortorrómbico* (ejemplos: *nitro, sulfato de magnesia*).

V. *Sistema clinorrómbico* (ejemplo: *sulfato de cal*).

VI. *Sistema asimétrico^o o triclinico* (ejemplo: *feldespató*).

Estos tres últimos sistemas presentan la misma anomalía. Tienen tres coeficientes lineales diferentes λ , λ' , λ'' , según tres direcciones rectangulares.

Esas direcciones son las mismas de los ejes en el cuarto sistema; pero no están determinadas, y carecen de relaciones simples con las de los ejes, en los dos últimos sistemas. Se tiene $K = \lambda + \lambda' + \lambda''$.

VII. *Anomalía del yoduro de plata.* — *Dilataciones negativas.* — Fizeau descubrió además que el *yoduro de plata* tiene la propiedad de *contraerse* cuando *sube* la temperatura y de *dilatarse* cuando la temperatura *baja*. El fenómeno permanece siendo perfectamente regular y continuo desde -10° hasta $+70^\circ$. De manera que la dilatación del yoduro de plata debe ser expresada entre estos límites, por un *coeficiente negativo*.

Los romboedros de espató *se dilatan*, por el contrario, en la dirección del eje cristalo-gráfico principal, mientras que *se contraen* en las direcciones perpendiculares. El *berilo* (cierta variedad de esmeralda) presenta una anomalía inversa a la del espató: su dilatación es *negativa* según el eje principal y *positiva* (aunque muy pequeña) según la dirección perpendicular al eje.

248. *Aplicaciones de las dilataciones de los sólidos.* — 1º *Correcciones a las medidas de longitudes.* — Las divisiones marcadas en las reglas graduadas aumentan de longitud con la temperatura, y su valor sólo es exacto a 0° . Por consiguiente, si en una medida cualquiera, se lee l centímetros en una regla cuya temperatura es t° y el coeficiente de dilatación lineal λ , la verdadera longitud medida es

$$l' = l (1 + \lambda t).$$

* El cuerpo no es necesariamente un cristal. El método es general y el aparato, tal como está instalado en la oficina internacional, con el nombre de *dilatómetro*, puede aplicarse a un sólido cualquiera.

Así es como se corrigen las medidas de longitudes, determinando para cada medida la temperatura de la regla.

2º *Péndulos y péndolas compensadores.* — La desigual dilatación de los metales ha recibido importante aplicación en los *péndulos compensadores*. La dilatación inevitable de la varilla se compensa en ellos de manera que el periodo de oscilación quede independiente de la temperatura: condición necesaria para que el isocronismo sea invariable. Se han propuesto numerosos sistemas de compensación.

1º *Péndulo de Leroy o péndola de varillas.* — En este aparato, la lenteja (fig. 277) está suspendida de una serie de varillas de acero y de latón alternativamente (en la figura, las negras son las de acero), ajustadas de tal modo que la dilatación del acero tiende a bajar la lenteja, mientras que la de latón tiende a subirla en la misma proporción. Como el latón se dilata más que el acero, su longitud total debe ser más corta. Las longitudes de acero y de latón que verifican la compensación, están determinadas empíricamente.

2º *Compensador Graham.* — Este péndulo está formado de una varilla de

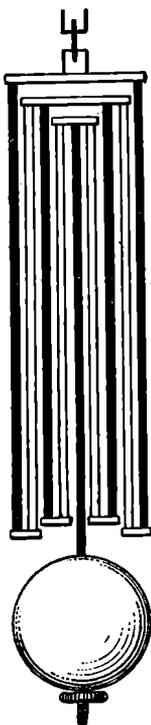


Fig. 277.

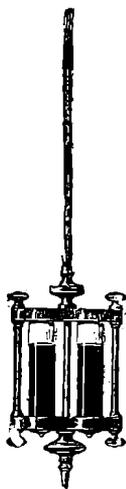


Fig. 278.

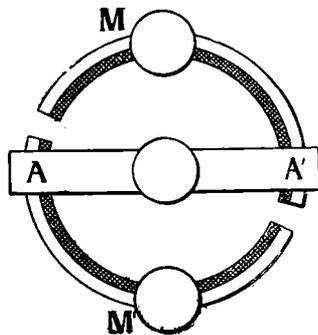


Fig. 279.

acero (fig. 278) que sostiene dos cilindros de cristal casi llenos de mercurio. De manera que el centro de gravedad baja por efecto de la dilatación de la varilla, pero sube a consecuencia de la del mercurio. Hay que calcular empíricamente la altura del mercurio que se necesita emplear para obtener una compensación perfecta. Se puede poner un solo tubo de mercurio en vez de dos.

3º *Compensación de balancines de relojes y cronómetros.* — El volante del balancín está formado por dos arcos, constituidos por dos metales diferentes (fig. 279), latón exteriormente y acero por dentro, y unidos por una barra metálica AA'. Los arcos llevan dos masas MM'. Al elevarse la temperatura, como el latón se dilata más que el acero, los arcos se arquean más y las masas MM' se acercan al centro. Esto originaría una disminución del periodo de oscilación, si el aumento de temperatura no produjese, al mismo tiempo, un efecto contrario por su acción sobre el muelle espiral. Las masas MM' pueden colocarse de manera que la compensación se verifique para cualquier temperatura.

249. **Efectos mecánicos de las dilataciones y de las contracciones de los sólidos.** — Al dilatar el calor los cuerpos sólidos, produce un efecto inverso al de una compresión. Ahora bien, ya sabemos que para disminuir las dimensiones de los sólidos hay que emplear fuerzas considerables, toda vez que estos cuerpos son poco compresibles. Luego para oponerse a la dilatación de un cuerpo sólido, habrá que emplear esfuerzos considerables, y lo mismo ocurrirá respecto de su contracción por enfriamiento. Por esta razón, en los puentes de hierro de vigas

rectas, sólo un extremo del puente está fijo en una obra de mampostería, y el otro puede dilatarse libremente sobre una especie de rodillos.

Es preciso tener muy en cuenta estos enormes efectos mecánicos en las construcciones metálicas. Por ejemplo, conviene dejar siempre a las piezas de hierro un juego suficiente para las variaciones de longitudes térmicas para evitar deformaciones o roturas.

Utilizanse estos efectos para poner aros de hierro a las ruedas de los carros. Se calienta lo suficiente el aro y se introduce en él la rueda de madera, que entra exactamente a la temperatura en que se halla el hierro. Este se contrae luego por enfriamiento y aprieta enérgicamente las pinas de la rueda. De la misma manera se adapta un aro de acero a las ruedas fundidas de los vagones de ferrocarril.

Por eso, para que aprieten con más fuerza, se romachan en caliente los roblones que reúnen las piezas de las construcciones metálicas.

DILATACIÓN DE LOS LÍQUIDOS

250. Definiciones. — Dilatación absoluta del mercurio. — Como un líquido tiene que estar forzosamente encerrado en un vaso que se dilata a su vez cuando la temperatura se eleva, la variación de nivel del líquido en el vaso mide su *dilatación aparente* y no su verdadera dilatación o *dilatación absoluta*.

No obstante, puede estudiarse la dilatación absoluta de un líquido contenido en un vaso sin que intervenga la dilatación de éste según un método imaginado por Dulong y Petit que aplicaron al mercurio.

Supongamos que se haya introducido mercurio en un sistema de dos vasos comunicantes, formado por los tubos verticales A B (fig. 280), unidos por un tubo horizontal C D*. Si la temperatura es la misma por las dos partes, los niveles de ambos tubos se hallarán en el mismo plano horizontal. Pero, si se rodea A de hielo, para mantener su temperatura a 0°, y B de una manga que contenga agua o cualquier otro líquido**, calentado a una temperatura de t° , determinada por un termómetro T, como la densidad del mercurio a 0° es superior a la que tiene a t° , los dos vasos comunicantes contendrán dos líquidos diferentes y el nivel del mercurio será más elevado en B que en A.

Sean h_0 la altura del mercurio en el tubo A, encima del eje del tubo horizontal, y D_0 su densidad; h y D los mismos datos para el tubo B, a la temperatura t ; tendremos,

$$hD = h_0D_0.$$

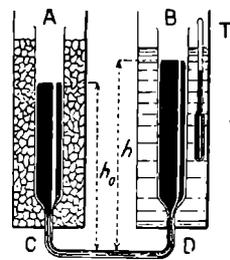


Fig. 280.

* Este tubo debe ser capilar, de lo contrario se producirían en él movimientos de mercurio, y perfectamente horizontal.

** Para pasar de los 100°, punto de ebullición del agua, se puede emplear aceite o soluciones salinas.

Por otra parte,
$$D = \frac{D_0}{1 + mt}$$

(m , coeficiente de dilatación absoluta del mercurio).

Sustituyendo, resulta :

$$\frac{hD_0}{1 + mt} = h_0D_0; \quad \text{de donde} \quad m = \frac{h - h_0}{h_0t}.$$

Basta, pues, medir, en el catetómetro, h_0 y la diferencia $h-h_0$, para deducir el coeficiente de dilatación absoluta. Esta fórmula da el *coeficiente medio de dilatación del mercurio* entre 0° y t° .

Experimentos de Regnault. — Regnault prosiguió estas medidas haciéndolas más precisas, y así halló, para el coeficiente medio entre 0° y 50° , $\frac{1}{5547}$.

Además, ha demostrado que la dilatación de la unidad de volumen entre 0° y t° no es proporcional a la temperatura t , y puede representarse por la fórmula empírica $\Delta_t = at + bt^2$.

Los coeficientes a y b dependen de la temperatura t . Entre los límites 0° y 300° sus valores son :

$$a = 0,000180 \quad \text{y} \quad b = 0,00000002.$$

251. Aplicación de la dilatación del mercurio a la corrección barométrica. — La altura del mercurio en un barómetro no sólo depende de la presión por medir, sino también de la temperatura de la columna mercurial; porque, como la densidad del mercurio varía con la temperatura, una misma presión será, según la temperatura, equilibrada por diferentes alturas del mercurio. Para hacer comparables todas las observaciones se conviene en averiguar lo que serían si la temperatura del mercurio hubiese sido 0° . Para esto, mídese la temperatura t a que se efectúa el experimento, por medio de un termómetro colocado contra el tubo barométrico.

Sea H la altura barométrica indicada a la temperatura t y ya corregida de la dilatación de la regla; D , la densidad del mercurio a t° ; D_0 , su densidad a 0° . La altura H_0 que hubiera indicado el barómetro si la temperatura hubiese sido 0° es tal que tendremos :

$$H_0D_0 = HD; \quad \text{pero} \quad \frac{D}{D_0} = \frac{1}{1 + mt}.$$

Luego

$$H_0 = \frac{H}{1 + mt}.$$

Esta corrección es importante, porque una variación de temperatura de 1° lleva consigo una corrección de más de una décima de milímetro para una altura barométrica de 76 cm.

252. Dilatación de un líquido cualquiera. — **Dilatómetro de v**

* La curva de la dilatación cúbica, en función de la temperatura, tiene una curvatura notable, por estar la concavidad vuelta hacia el eje de las dilataciones.

tago. — Para un líquido cualquiera se emplea el *dilatómetro* (fig. 281). Es un aparato parecido al termómetro y cuyo vástago está graduado en partes de igual volumen.

Se empieza por buscar la relación entre el volumen N del depósito, hasta el cero de la graduación, y el volumen de una división. Para esto se tara el aparato vacío, poniendo a su lado suficiente número de pesas; luego, se introduce en él mercurio, hasta una división d próxima a la parte inferior del vástago. Se vuelve a colocar el aparato en el platillo de la balanza. Para restablecer el equilibrio hay que quitar una masa m , que representa la masa de mercurio que ocupa $N + d$ divisiones. Se vuelve a añadir mercurio hasta una división d' , situada cerca del extremo superior del vástago y se pone de nuevo el aparato en la balanza. Hay que extraer, otra vez, una masa m' gramos: m' es la masa de mercurio que llena $d' - d$ divisiones. Tendremos, pues, la ecuación simple :

$$\frac{m}{m'} = \frac{N + d}{d' - d},$$

de donde se saca el valor de N .

Después de retirar un poco de mercurio, se coloca el aparato entre hielo y se apunta la división n_0 en que se detiene el mercurio. Se calienta a t_0 y el mercurio se detiene en la división n . Si llamamos m al coeficiente de dilatación del mercurio y k al del vaso, tendremos, admitiendo que a t_0 el volumen de lo contenido iguale al volumen de lo continente :

$$(N + n_0) (1 + mt) = (N + n) (1 + kt).$$

De donde se saca el valor del coeficiente k de dilatación del vaso.

Después, se repite el experimento con otro líquido, y se llega a una ecuación muy parecida; pero en la cual k es conocida, y se deduce el coeficiente de dilatación del líquido.

El coeficiente medido de este modo es el coeficiente medio entre 0° y t_0 .

Resultados generales. — 1º He aquí, a título de ejemplo, los coeficientes de dilatación de algunos líquidos. Son relativos a temperaturas poco separadas de la temperatura ordinaria.

Glicerina	0,00053	Tolueno	0,00120
Petróleo.	0,00104	Bencina.	0,00138
Alcohol	0,00105	Sulfuro de carbono	0,00147

2º En la mayoría de los líquidos, este coeficiente aumenta cuando sube la temperatura.

3º *Coficiente medio entre dos temperaturas.* — Sean v y v' los volúmenes a t_0 y t' ; el coeficiente medio entre t_0 y t' es $\frac{1}{v} \frac{v' - v}{t' - t}$. Y si la variación $t' - t$ de temperatura es muy pequeña, se podrá decir que es el coeficiente a la temperatura media θ entre t_0 y t' . Ese coeficiente medio caracteriza la dilatabilidad del líquido a esta temperatura y a la presión constante a que se calienta el cuerpo.

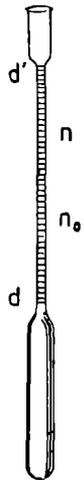


Fig. 281.

4º *Influencia de la temperatura y de la presión.* — *Experimentos de Amagat.* — El coeficiente medio de los líquidos varía con la temperatura y con la presión. Amagat ha enunciado los resultados siguientes, aplicables a todos los líquidos que estudió, menos el agua.

A. El coeficiente de dilatación de los líquidos *disminuye regularmente* cuando la presión *aumenta*; esta disminución es tanto más rápida cuanto más elevada es la temperatura.

(Por ejemplo, el coeficiente medio del éter entre 0º y 20º es : 0,001582 bajo 1 atm, 0,000894 bajo 1000 atm, 0,000680 bajo 2000 atm, 0,000579 bajo 3000 atm).

B. El coeficiente de dilatación de los líquidos *aumenta regularmente* cuando la temperatura *sube* : este aumento es tanto *menos rápido* cuanto *más fuerte* es la presión, y bajo una presión suficiente, llega a ser *insensible*.

(Por ejemplo, bajo la presión constante de 200 atm, el coeficiente del éter es igual a : 0,001320 entre 0º y 20º; 0,001469 entre 40º y 60º; 0,001614 entre 80º y 100º; 0,002156 entre 138º y 198º; bajo la presión de 1000 atm este coeficiente es sensiblemente constante entre estos límites e igual a 0,0009.)

5º *Enorme dilatibilidad de los líquidos muy volátiles.* — *Experimentos de Drion, de Amagat, y de Cailletet y Mathias.* — Ciertos líquidos muy volátiles y que entran en ebullición a bajas temperaturas, — tales como los gases convertidos en líquidos, — poseen una dilatibilidad comparable y aun superior a la de los gases.

Ya, en 1836, señaló Thilorier la enorme dilatación que experimenta el anhídrido carbónico líquido entre 0º y 30º.

Los experimentos de Drion han confirmado esta curiosa anomalía respecto de tres líquidos volátiles, de naturaleza muy diferente, el éter clorhídrico, el peróxido de nitrógeno y el anhídrido sulfuroso. Para el éter clorhídrico, el coeficiente de dilatación *llega* al del aire a la temperatura de 110º, y *se hace tres veces mayor* a 93º. Para el peróxido de nitrógeno, el coeficiente es *mayor* que el del aire desde 110º. Para el anhídrido sulfuroso, el coeficiente es igual al del aire desde 80º, y *triple* del mismo a 130º.

Según los experimentos de Amagat, el coeficiente medio del anhídrido carbónico líquido, entre 20º y 30º y bajo la presión de 75 atm, es igual a 0,02166, sea *siete veces* el de los gases perfectos. Puede llegar a ser aún mucho mayor, pues *a la temperatura y bajo la presión crítica* (323), su valor se convierte en *infinito*.

Así resulta, efectivamente, de los experimentos de Cailletet y Mathias, que han estudiado el anhídrido sulfuroso hasta la temperatura y presión críticas. Estos experimentadores hallaron : entre 156º y 155,5 $\alpha = 0,7371$; entre 155,5 y 155, $\alpha = 0,2273$; entre 155º y 154, $\alpha = 0,1345$; entre 152º y 150, $\alpha = 0,04457$.

253. **Dilatación del agua.** — La experimentación ha demostrado que si se toma agua a la temperatura más baja en que pueda estar líquida, (se puede obtenerla en sobrefusión a -20°), y si se eleva su temperatura, el agua empieza por contraerse hasta llegar a los 4º. Después, se dilata como cualquier otro líquido. Por lo tanto, una masa determinada de agua, presenta un volumen mínimo a 4º.

Despretz ha hecho los experimentos de medida sirviéndose del dilatómetro de vástago. Para eso estudiaba la variación del nivel del agua en un dilatómetro, puesto en un baño cuya temperatura indicaba un termómetro de mercurio. El cuadro siguiente da los aumentos de volumen que experimentan 1 000 cm³ de agua a 4º, a las diferentes temperaturas indicadas.

Al mismo tiempo se han inscrito las densidades correspondientes del agua.

Temperaturas.	Aumentos de volúmenes desde 4º.	Densidades.
— 10º	1,86	0,9981
— 5º	0,698	0,9992
0º	0,127	0,9998
4º	0	0,999972
8º	0,121	0,9998
10º	0,268	0,9997
20º	1,79	0,9982

Curva de dilatación del agua. — La figura 282 muestra la curva de dilatación del agua. Se han indicado en abscisas las temperaturas y, en ordenadas, el aumento de volumen que experimentan 1 000 cm³ de agua a 4° cuando se pasa de 4° a una temperatura cualquiera comprendida entre -10° y +20°. Esta curva muestra inmediatamente que la masa de agua considerada tiene un volumen mínimo a 4°.

254. **Máximum de la densidad del agua.** — Puesto que una masa de agua a 4° posee un volumen mínimo, debe tener, a esta temperatura, el máximum de densidad.

Experimentos de Hope y Despretz. — Puede demostrarse el máximum de densi-

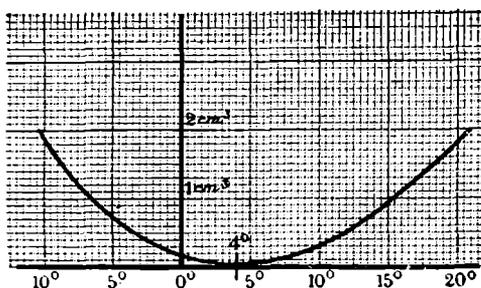


Fig. 282.

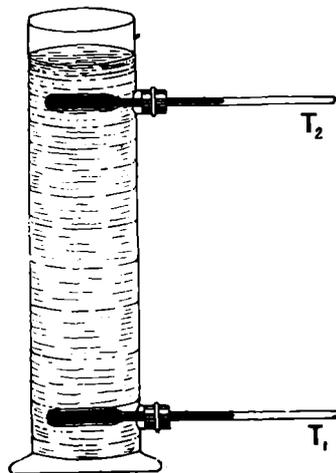


Fig. 283.

dad, por medio de un experimento clásico, debido a Hope y perfeccionado por Despretz. He aquí otro, cuyo principio es análogo: En una probeta de pie se fijan dos termómetros cuyos depósitos penetran, uno en la capa superior del líquido y el otro en la inferior (fig. 283). Se llena el aparato de agua helada, y se deja calentar lentamente al aire. Entonces se nota que el termómetro superior permanece casi estacionario, mientras que el inferior sube rápidamente a 4°; después, éste queda estacionario a su vez, mientras que el superior empieza a subir, no solamente hasta a 4°, sino hasta la temperatura ambiente. Mientras tanto el termómetro inferior sube con más lentitud. Luego al calentarse el agua hasta 4°, va aumentando de densidad, puesto que cae al fondo de la probeta; pero al calentarse mucho más, ella se dilata puesto que entonces sube a la parte superior. Luego alcanza su máximum de densidad a 4°.

Cambio del máximum de densidad por efecto de la presión. — *Experimentos de Amagat.* — Los resultados precedentes se refieren a la presión normal. Cuando la presión cambia, también varía la temperatura del máximum. Según los experimentos de Amagat, esta temperatura baja próximamente 1° por 50 atmósferas de presión.

Por lo demás, la anomalía que presenta el agua se refiere a la compresibilidad; esta anomalía desaparece a medida que aumenta suficientemente la temperatura o la presión: según los trabajos de Amagat, a una presión próxima a 3 000 atmósferas las anomalías acaban por completo y el agua vuelve a entrar en el caso normal de los demás líquidos.

Máximum de densidad de las soluciones salinas. — Despretz probó también que el agua del mar y algunas disoluciones salinas presentan la anomalía del máximum de densidad; y observó que la presencia de las sales disueltas en el agua baja la temperatura de ese máximum. La de congelación de dicho líquido desciende también por el mismo motivo, pero no tanto. Así, el agua de mar, que se congela a -1°,70, no tiene

su máximo de densidad más que a $-3^{\circ}.67$. De ahí resulta que la observación del máximo es bastante difícil en estos líquidos, pues hay que evitar que el cambio de estado se produzca antes del máximo de densidad. Esto se logra utilizando el fenómeno de la *sobrefusión* (277). El agua del mar, siempre agitada, se congela siempre antes de llegar a temperatura bastante baja para alcanzar su máximo de densidad.

CAPÍTULO III

DILATACIÓN Y DENSIDAD DE LOS GASES

255. Dilatación de los gases. — *1º Dilatación a presión constante.* — Si se mantiene constante la presión de una masa de gas y se eleva su temperatura, su volumen aumenta. Inversamente, cuando la temperatura del gas baja, su volumen disminuye. Este fenómeno ha sido estudiado de un modo preciso, primero, por Gay-Lussac, y luego, por otros varios experimentadores y, entre ellos, Regnault. El fundamento de estos experimentos consiste en medir el volumen de una masa de gas, primero a 0° ; después, a una temperatura dada y a presión constante. Repitiendo estas medidas para temperaturas variadas, se puede conocer la ley de dilatación del gas.

2º Aumento de presión a volumen constante o dilatación a volumen constante. — Si se mantiene constante el volumen de un gas y se eleva su temperatura, su presión aumenta. Este fenómeno se llama impropriamente *dilatación a volumen constante*. Se le puede estudiar por medio del aparato que ya hemos descrito como termómetro de gases (237). Se busca, a diversas temperaturas, la presión de un gas contenido en el depósito y mantenido a volumen constante. Regnault ha hecho numerosos experimentos parecidos.

256. Resultados. — **Coefficientes de dilatación de los gases.** — Las leyes de estos dos fenómenos son sencillas en caso de que el gas esté lejos de las condiciones de licuefacción, como el aire, el oxígeno, el nitrógeno, el hidrógeno, etc.

1. Dilatación a presión constante. — *1º Un gas se dilata uniformemente cuando su temperatura se eleva.*

Es decir, que para toda elevación de 1° en la temperatura, a partir de cualquier temperatura, el aumento de volumen es el mismo, y es, además, independiente de la presión.

2º Todos los gases se dilatan igualmente.

Si se toma volúmenes de dos gases diferentes, iguales a temperatura determinada, estos volúmenes permanecerán iguales a cualquier temperatura.

Coefficiente de dilatación. — *Llámanse coeficiente de dilatación de un gas, a presión constante, el aumento de volumen α que experimenta la unidad de volumen del gas, medida a 0° cuando la temperatura sube 1° .*

Conforme a los resultados precedentes, α es independiente de la temperatura desde la cual se ha producido el aumento de 1° ; es también independiente de la presión, y es la misma para todos los gases. El conjunto de estos resultados constituye la *ley de Gay-Lussac*. El valor de α es $\frac{1}{273} = 0.00366$.

Fórmula de la dilatación. — Sea v_0 el volumen de una masa de gas a 0° ; el aumento de este volumen, para una elevación de temperatura t es, pues, $v_0\alpha t$, y, a t° el volumen se convierte en $v = v_0 + v_0\alpha t$, o :

$$[1] \quad v = v_0(1 + \alpha t).$$

II. *Dilatación a volumen constante.* — La dilatación a volumen constante sigue las mismas leyes que la dilatación a presión constante ;

Sea p_0 la presión de una masa de gas a 0° , y p su presión a t° en el mismo volumen; llamase *coeficiente de aumento de presión a volumen constante*, la magnitud β definida por la ecuación :

$$[2] \quad p = p_0(1 + \beta t).$$

β es independiente de la temperatura t y de la presión inicial p_0 (es decir del volumen constante que el gas ocupa). Además se tiene :

$$\beta = \alpha = \frac{1}{273}.$$

257. **Gases perfectos.** — Se llama *gas perfecto* el gas que cumple la ley de Mariotte (171) y las leyes simples de dilatación que acabamos de enunciar. Ningún gas natural sigue rigurosamente estas leyes. Por lo tanto, no hay gases perfectos; pero, muchos gases, distantes de sus condiciones de licuefacción, siguen, muy aproximadamente, las leyes de los gases perfectos.

OBSERVACIÓN. — Si un gas sigue la ley de Mariotte, se puede demostrar que su coeficiente de dilatación a presión constante es igual a su coeficiente de dilatación a volumen constante. En efecto, supongamos diferentes estos coeficientes, y llamemos α al primero y β al segundo.

Tomemos una masa de gas a 0° y bajo la presión p_0 , siendo v_0 su volumen. Elevemos su temperatura a t° , primero a la presión constante p_0 . El volumen se convierte en :

$$v = v_0(1 + \alpha t), \quad \text{siendo la presión } p_0.$$

Elevemos, después, su temperatura a t° ; pero a volumen constante v_0 ; la presión es :

$$p = p_0(1 + \beta t), \quad \text{siendo el volumen } v_0,$$

Si es aplicable la ley de Mariotte, tendremos, a la temperatura t :

$$pv_0 = vp_0, \quad \text{o} \quad p_0v_0(1 + \beta t) = v_0p_0(1 + \alpha t), \quad \text{de donde} \quad \alpha = \beta.$$

Pero, como los gases no siguen exactamente la ley de Mariotte y son, generalmente, más compresibles, tendremos :

$$pv_0 < vp_0, \quad \text{de donde} \quad \beta < \alpha.$$

Al contrario, en el hidrógeno, que es menos compresible de lo que quiere la ley de Mariotte, $\beta > \alpha$.

ECUACIÓN DE LOS GASES PERFECTOS. — Tomemos una masa de un gas perfecto a 0° y bajo la presión normal p_0 . Llevemos este gas hasta t° bajo la presión p ; el volumen v final es independiente de la manera de que hemos hecho variar la presión y la temperatura. Podemos, por ejemplo, dejar constante la presión, al principio, para el valor p° , y

variar la temperatura de 0° a t° ; el volumen se convierte entonces en $v = v_0 (1 + \alpha t)$. Variemos, luego, la presión de p_0 a p , y el volumen será :

$$v = v_1 \frac{p_0}{p} = \frac{v_0 p_0 (1 + \alpha t)}{p}.$$

De donde :

$$[3] \quad \frac{pv}{1 + \alpha t} = p_0 v_0.$$

Del mismo modo, para otras temperaturas t' t'' ... y otras presiones p' , p'' ..., se hubiera hallado :

$$\frac{p'v'}{1 + \alpha t'} = p_0 v_0; \quad \frac{p''v''}{1 + \alpha t''} = p_0 v_0.$$

Luego

$$[3'] \quad \frac{p'v'}{1 + \alpha t'} = \frac{pv}{1 + \alpha t}.$$

El cociente $\frac{pv}{1 + \alpha t}$ tiene, pues, valor constante para una masa dada de un gas perfecto.

La igualdad [3] se llama *ecuación de los gases perfectos*.

OBSERVACIÓN. — En las fórmulas precedentes [2] y [3], se puede sustituir las presiones p_0 y p por las alturas H_0 y H del mercurio que las equilibran.

258. **Usos de la ecuación de los gases perfectos.** — 1º *Conociendo el volumen v_0 de un gas a 0° bajo la presión de 76 cm. de mercurio, calcular su volumen v a t° y bajo la presión H .*

De [3] se deduce :

$$v = \frac{v_0 (1 + \alpha t) \times 76}{H}.$$

2º *Conociendo el volumen v de un gas a t° y a la presión H , calcular su volumen v_0 a 0° a la presión 76. Tenemos*

$$v_0 = \frac{vH}{76(1 + \alpha t)}.$$

3º *Conociendo el volumen v de un gas a t° , a la presión H , calcular su volumen v' a t'° bajo la presión H' .*

De la ecuación [3'] se saca :

$$v' = \frac{vH(1 + \alpha t')}{H'(1 + \alpha t)}.$$

Otra forma de la ecuación de los gases perfectos. — La ecuación [3] podemos expresarla en la forma :

$$pv = p_0 v_0 \alpha \left(\frac{1}{\alpha} + t \right)$$

Pero,

$$\frac{1}{\alpha} + t = 273 + t = T$$

siendo T la temperatura absoluta del gas (236).

Luego

$$pv = p_0 v_0 \alpha T.$$

De donde, haciendo $p_0 v_0 \alpha = R$,

$$[4] \quad pv = RT.$$

Mezcla de gases a temperaturas diferentes. — Supongamos que en un volumen V donde se fije la temperatura final T , se mezclen varias masas de diversos gases perfectos, teniendo el primero un volumen v a una temperatura t , bajo una presión p ; el segundo en las condiciones p' t' v' ; el tercero en las condiciones p'' , v'' , t'' , etc. Calculemos la presión x que tendría el primer gas en el volumen V a la temperatura T ; está dada por la ecuación de los gases perfectos :

$$\frac{xV}{1 + \alpha T} = \frac{pv}{1 + \alpha t}, \quad \text{de donde} \quad x = \frac{pv(1 + \alpha T)}{V(1 + \alpha t)}.$$

De la misma manera las presiones que tomarían las demás masas de gas en las mismas condiciones serían respectivamente :

$$x' = \frac{p'v'(1 + \alpha T)}{V(1 + \alpha t')}; \quad x'' = \frac{p''v''(1 + \alpha T)}{V(1 + \alpha t'')} \text{ etc.}$$

La presión total P será, conforme a la ley de la mezcla de los gases (177).

$$P = \frac{\rho^r (1 + \alpha T)}{V (1 + \alpha t)} + \frac{\rho^{r'} (1 + \alpha T)}{V (1 + \alpha t)} + \frac{\rho^{r''} (1 + \alpha T)}{V (1 + \alpha t)} + \dots$$

De donde

$$\frac{PV}{1 + \alpha T} = \frac{\rho^r}{1 + \alpha t} + \frac{\rho^{r'}}{1 + \alpha t} + \frac{\rho^{r''}}{1 + \alpha t} \quad (\text{o bien} = \Sigma \frac{\rho^{r''}}{1 + \alpha t}).$$

259. — **Estudio experimental de la dilatación de los gases.** — La dilatación de los gases fué, al principio, estudiada casi simultáneamente por Gay-Lussac, en Francia, y Dalton, en Inglaterra. Gay-Lussac dedujo las leyes simples que hemos enunciado (256). Estos resultados, que convertían a todos los gases en gases perfectos han sido rebatidos por Rudberg, Regnault, Magnus y Amagat.

1. *Experimentos de Regnault.* — Entre los numerosos experimentos de Regnault, describiremos sólo aquellos por los cuales ha medido los *coeficientes medios* de dilatación de los gases entre 0° y 100° bajo presión constante.

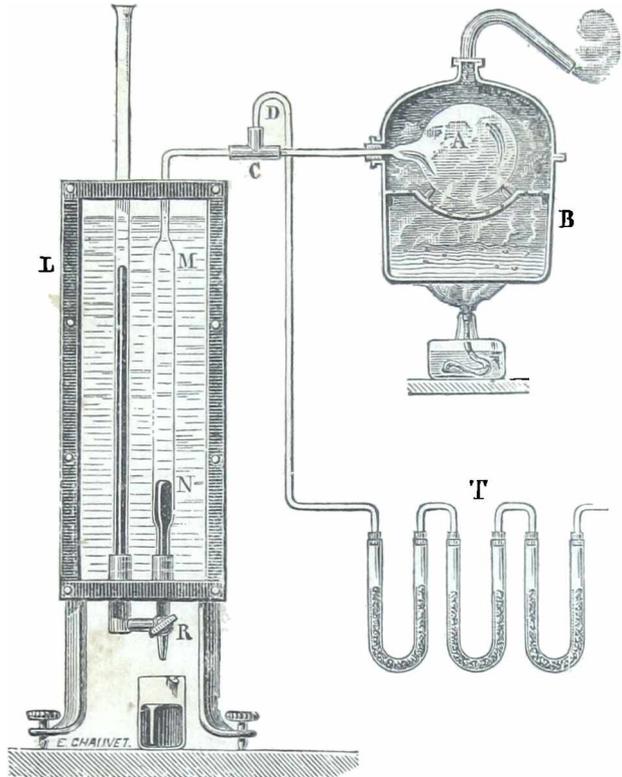


Fig. 284.

1° *Descripción del aparato.* —

Un matraz A (fig. 284) provisto de un conducto lateral permite hacer el vacío en él, o introducir el gas a voluntad, y el *manómetro Regnault* MNR son las dos piezas principales del aparato. El tubo MN del manómetro, así como el capilar que lo pone en comunicación con el matraz, se afoflan y gradúan con cuidado. Una estufa de agua B permite elevar el matraz a la temperatura del vapor de agua hirviendo. Un cilindro envolvente L, por donde pueden circular de manera continua las aguas del servicio público, permite conservar las dos ramas del manómetro a temperatura constante 0. Por fin, la serie T de tubos en U, unidos con el cuello del matraz por mediación del tubo D en forma de T, sirve para introducir en el aparato gases perfectamente secos y puros.

2° *Marcha de la operación.* — Se opera al principio a 0°; la estufa está llena de hielo fundente y el matraz con gas seco y puro. Los niveles del mercurio son llevados al mismo plano horizontal M y L. Tómassé nota de la presión atmosférica del momento H, así como la temperatura ambiente t.

Después se calienta el matraz hasta T° en la estufa (temperatura del vapor de agua hirviendo). El nivel del mercurio sube en la rama mayor del manómetro. Entonces se deja salir mercurio, por medio de la llave de tres vías R, hasta que los dos niveles vuelvan a N, en el mismo plano horizontal. Al llegar aquí se toma nota de la presión H, así como de la temperatura ambiente t'; por fin, se mide con precisión el volumen u, igual a MN, que representa la dilatación del gas.

3° *Calculo del experimento.* — Sean α el coeficiente incógnito del gas y K el del vaso. En la primera fase se tienen dos masas de gas a igual presión H a dos temperaturas diferentes 0° y t . Luego se tiene

$$\frac{VH}{1} + \frac{vH}{1 + \alpha t} = \text{constante.}$$

En la segunda fase, se tienen tres masas de gas a la misma presión H', pero a tres temperaturas distintas, T, t' y θ . Luego se tiene :

$$\frac{V(1 + KT)H'}{1 + \alpha T} + \frac{vH'}{1 + \alpha t} + \frac{uH'}{1 + \alpha \theta} = \text{constante,}$$

de donde

$$[1] \quad \left(V + \frac{v}{1 + \alpha t} \right) H = \left[\frac{V(1 + KT)}{1 + \alpha T} + \frac{v}{1 + \alpha t} + \frac{u}{1 + \alpha \theta} \right] H'$$

Hay que observar que, siendo H y H' muy poco diferentes, se puede aplicar aquí perfectamente la ley de Mariotte.

La incógnita α está comprendida en una ecuación que sería de *cuarto grado*.

Regnault despejaba sus raíces, aplicando el método de las *aproximaciones sucesivas*. Teniase :

$$[2] \quad 1 + \alpha T = \frac{H'(1 + KT)}{H + \frac{v}{V} \cdot \frac{H}{1 + \alpha t} - \frac{v}{V} \cdot \frac{H'}{1 + \alpha t'} - \frac{u}{V} \cdot \frac{H'}{1 + \alpha \theta}}$$

Sirviéndose de un primer valor aproximado de α , por ejemplo del coeficiente de Gay-Lussac 0,00375 se calculaba primeramente el denominador del segundo miembro, lo que permitía obtener un primer valor aproximado del binomio $1 + \alpha T$, y por consiguiente de α . Sea α' este primer valor aproximado.

Sustituyendo este primer valor α' en el segundo miembro de la fórmula, será posible calcular un nuevo valor α'' más aproximado que el primero. Así se obtendrá una serie de valores α' , α'' , ..., cada vez más aproximados y más cercanos uno de otro. La operación terminará cuando la diferencia entre dos valores consecutivos de la serie sea de un orden de magnitud inferior al de los errores de experiencia probables.

II. *Experimentos de Amagat.* — *Leyes generales.* — Los coeficientes bajo presión constante y bajo volumen constante, varían con la presión y con la temperatura. Amagat ha deducido los resultados siguientes de sus estudios sobre la compresibilidad de los gases a diversas temperaturas (318), los cuales son relativos a coeficientes definidos de una manera algo diferente de los precedentes. Sean v y v' los volúmenes de una masa determinada de un gas a dos temperaturas t y t' bajo la misma presión p . Llámase coeficiente medio de dilatación entre t y t' a la presión constante p , la magnitud $\frac{1}{v} \frac{v' - v}{t' - t}$; el límite de esta igualdad cuando t' tiende hacia t es el coeficiente verdadero a t° bajo la presión p .

Del mismo modo, si p y p' son las presiones de una masa de gas a t° y t'° en un mismo volumen, el coeficiente medio de aumento de presión entre t y t' es $\frac{1}{p} \frac{p' - p}{t' - t}$, siendo el verdadero coeficiente a t° el límite de esta expresión cuando t' tiende hacia t . Estos son los coeficientes que intervienen en las fórmulas de la termodinámica.

A. *Coficiente bajo presión constante.* — 1° Cuando la presión crece, el coeficiente (á una temperatura o entre límites dados), aumenta primeramente, pasa por un máximo, y después disminuye; este máximo se presenta bajo una presión tanto más fuerte cuanto más elevada es la temperatura.

(Por ejemplo para el ácido carbónico, el máximo entre 40° y 50° (0,007566) ocurre bajo 90 atm., mientras que entre 100° y 137° (0,00945) se efectúa bajo 400 atm. Otro ejemplo : bajo 3 000 atm., el coeficiente del hidrógeno entre 0° y 47° (0,00123) es casi tres veces más pequeño que bajo la presión normal : apenas resulta superior al del alcohol bajo esta misma presión).

2° Cuando sube la temperatura, el coeficiente (para una presión dada) aumenta, pasa por un máximo y después disminuye; esto máximo se realiza a una temperatura tanto más elevada cuanto mayor es la presión. Después de este máximo y a una temperatura suficientemente alta, el aumento de volumen es sensiblemente proporcional a la elevación de temperatura.

(Por ejemplo, para el ácido carbónico, el máximo bajo la presión de 100 atm. (0,005899) se efectúa entre 40° y 50° , mientras que bajo la presión de 250 atm. (0,00865) ocurre entre 90° y 100°).

B. *Coefficientes de volumen constante.* — 1º Si la presión aumenta, el coeficiente (entre límites dados de temperatura) crece y pasa por un máximo tanto menos pronunciado cuanto más elevada es la temperatura.

2º Para temperaturas crecientes, el coeficiente está sensiblemente en razón de la presión media y por consiguiente disminuye continuamente.

DENSIDAD DE LOS GASES

260. **Definiciones y fórmulas.** — La masa, específica de un gas es esencialmente variable con su presión y su temperatura.

A fin de tener una cifra constante para un mismo gas se define la *densidad con relación al aire*, que se llama sencillamente *densidad del gas* : es la relación entre la masa de un cierto volumen de este gas y la de un volumen igual de aire — estando el gas y el aire a la misma temperatura y bajo la misma presión.

El aire puede considerarse como gas perfecto; si sucede lo mismo con otro gas, su densidad con relación al aire, permanece constante a cualesquiera temperatura y presión, porque dos volúmenes iguales de este gas y de aire son iguales sean cuales fueren su presión y temperatura.

Regnault determinó las densidades de los diversos gases; determinó también la masa de 1 centímetro cúbico de aire, a 0º y a la presión de 76 centímetros de mercurio, hallando 0,001293 gr. (Masa de 1 litro = 1,293 gr.)

Fórmulas. — 1º *Aire.* — Sea V un volumen de aire a t^0 , bajo la presión de H centímetros de mercurio. Sabemos (258) que si se somete esta masa de aire a 0º bajo la presión de 76 centímetros de mercurio, su volumen será :

$$V_0 = \frac{VH}{76(1 + \alpha t)}$$

Su masa es, pues :

$$[1] \quad M' = 0,001293 \frac{VH}{76(1 + \alpha t)}$$

2º *Cualquier gas.* — Sea M la masa del volumen V del gas, a la temperatura t y bajo la presión H. Por definición, su densidad con relación al aire es $d = \frac{M}{M'}$. De donde $M = M'd$.

Por consiguiente :

$$[2] \quad M = 0,001293d \frac{VH}{76(1 + \alpha t)}$$

Si se quiere calcular la *masa específica* o *densidad absoluta* del aire o de un gas a una temperatura y una presión cualesquiera, basta hacer a $V = 1$ en las fórmulas [1] o [2].

261. **Determinación de la densidad de un gas.** — **Método de Regnault.** — Una de las principales dificultades con que se tropieza en la pesada de los gases es la influencia del empuje del aire, que es importante, porque es del orden de magnitud de la cantidad por medir. Ahora bien, esta influencia está sujeta a variaciones que exceden los errores de medida, durante un experimento y a consecuencia de los cambios de temperatura y presión.

Empleo del matraz-tara. — Tómanse dos matraces de largo cuello, hechos con el mismo vidrio y que tengan volúmenes exteriores iguales. Estando los dos matraces suspendidos de los dos platillos de la balanza, los empujes del aire se equilibran a pesar de las variaciones de la densidad del aire exterior a consecuencia de las variaciones de temperatura y de presión atmosférica.

Manera de llenar el matraz a 0°. — Colócasele en un vaso lleno de hielo; después se le adaptan dos tubos con llaves, mediante las cuales se le puede poner en comunicación, sea con una máquina neumática, sea con un depósito que contenga el gas puro que llegará al matraz después de secarse en tubos que contengan una substancia ávida de vapor de agua.

Después de llenarlo una vez, se hace el vacío en el matraz y se le llena de gas otra y varias veces hasta que sólo quede gas perfectamente puro y seco. La última vez se pone el extremo de los tubos en comunicación con la atmósfera, de manera que el gas del matraz tome la presión atmosférica H y se la mide en ese instante con un barómetro.

Tara y pesada de los gases. — Entonces se cierra la llave, se retira el matraz del hielo, se le enjuga con cuidado, se le deja ponerse poco a poco a la temperatura ambiente y después se le lleva a la balanza descrita arriba y se hace su tara. Después se lleva de nuevo el matraz al hielo y se hace el vacío en él lo más completamente posible. Sólo queda escaso residuo gaseoso, a la presión h , que se lee por medio de un manómetro barométrico, y se le vuelve a poner en el mismo platillo de la balanza. Para restablecer el equilibrio hay que añadir al platillo la masa m que representa evidentemente la masa del gas contenido en el matraz a 0° y bajo la presión $H - h$.

Cálculo del experimento. — Para determinar la masa M que tendría un mismo volumen de este gas a la presión 76, se tiene, según la ley de Mariotte,

$$\frac{M}{m} = \frac{76}{H - h}, \quad \text{de donde} \quad M = m \times \frac{76}{H - h}.$$

Reptense las mismas pesadas con el aire, en el mismo matraz: hállese que la masa del aire, contenido allí a 0° y bajo la presión 76, está dada, en función de la masa m' determinada a 0° bajo una presión $H' - h'$, por la misma fórmula:

$$M' = m' \times \frac{76}{H' - h'}.$$

De ahí:

$$D = \frac{M}{M'} = \frac{m}{m'} \times \frac{H' - h'}{H - h}.$$

Experimento de Leduc. — Leduc ha repetido todas las medidas de Regnault relativas a la densidad de los gases, simplificando su método a la vez que introducía en él los perfeccionamientos siguientes:

Por este método halló cifras sensiblemente diferentes de las admitidas hasta hoy.

Oxígeno	1,1050	|	Nitrógeno	0,9720
Hidrógeno	0,06947		Protóxido de nitrógeno	1,0387

262. *Determinación de la masa del centímetro cúbico de aire normal.* — *Método de Regnault.* — Después de haber determinado la masa de aire M' que llena el matraz a 0° y bajo la presión normal, sólo faltaba por determinar el volumen V de este matraz para deducir de estos dos números, por la fórmula $a = \frac{M'}{V}$, la masa del centímetro cúbico de aire normal en las condiciones normales (0°76 cm.). Regnault efectuó esta última medida por medio de un *aforo con agua destilada.*

Primero hacía la tara del matraz, lleno de agua destilada a 0°. Sea M la masa de esta agua, B la del vidrio y ω el empuje del aire: la ecuación de este primer equilibrio era

$$\text{tara } (B + M)g - \omega.$$

Después de haber vaciado el matraz y de llenarlo de aire seco, a la temperatura de 0° y bajo la presión actual H' , volvía a colocarlo en el platillo de la balanza; para restablecer el equilibrio hay que agregar por la parte del matraz, pesos conocidos P . La nueva ecuación de equilibrio era

$$\text{tara } (B + A' + P)g - \omega'.$$

Restando las ecuaciones miembro a miembro, resulta

$$Mg - \omega - Pg - A'g + \omega' + 0.$$

P se obtiene directamente por la experiencia: A' es la masa de un volumen de aire

igual al del matraz á 0° y bajo la presión H' : se lo deduce de la masa M' (determinada precedentemente) por la ecuación $A' = M' \frac{H'}{76}$; por fin $w' - w$ es la diferencia de los empujes sufridos por el matraz en las dos pesadas: es despreciable respecto del peso del matraz lleno de agua. Tiénese en fin la ecuación

$$M = P + M' \frac{H'}{76}.$$

Ahora bien $M = Ve_0$, llamando e_0 a la masa específica del agua pura a 0°: de ahí se deduce V , y por consiguiente a .

CAPÍTULO IV

CALORIMETRÍA

263. Definiciones y principios. — Se dice que un cuerpo *gana calor*, cuando su temperatura se *eleva*, y que lo *pierde*, cuando ésta *baja*. El sol, los cuerpos en combustión que son capaces de calentar a los demás cuerpos, son considerados como *fuentes de calor*. Por otra parte, el calor emitido por una fuente puede tener otros efectos que calentar un cuerpo. Si se coloca un vaso que contenga hielo, en presencia de una fuente de calor, el hielo se fundirá más o menos pronto, según la intensidad de la fuente; pero en tanto que el hielo no esté completamente derretido, la temperatura del agua continuará siendo la misma (275). El calor desarrollado por la fuente tiene por efecto fundir el hielo sin cambiar su temperatura.

Una cantidad de calor se mide en *calorías*. La *caloría es la cantidad de calor necesaria para elevar de 15° a 16° la temperatura de un gramo de agua pura*. Se le llama también *pequeña caloría* por oposición a la *gran caloría* o *kilocaloría* que es la cantidad de calor necesaria para elevar de 15° a 16° la temperatura de 1 kilogramo de agua.

La *calorimetría* tiene por objeto la evaluación de las cantidades de calor. Se funda en los dos principios siguientes:

1° *La cantidad de calor necesaria para elevar un número de grados cualquiera la temperatura de un cuerpo es proporcional a su masa.*

De donde resulta que una gran caloría iguala a 1000 pequeñas calorías.

2° *La cantidad de calor perdida por una masa determinada de un cuerpo por un descenso de temperatura de t^0 a t^1 , es igual a la cantidad de calor ganada por el mismo cuerpo, en una elevación de temperatura de t^0 a t^1 .*

Este principio sólo es exacto si el cuerpo no ha recibido ni desarrollado ningún trabajo mecánico. Es una de las formas del *principio de la Conservación de la energía*.

264. Cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una

masa de agua. — La experimentación demuestra que si se mezclan masas iguales de agua a temperaturas diferentes, t y t' , la mezcla recibe la temperatura θ , media aritmética entre las dos temperaturas iniciales.

Admitiremos que el calor ganado por el agua al calentarse, es igual a la cantidad de calor perdida cuando se enfría. En consecuencia, 1 gr. de agua, al enfriarse de t' a θ , abandona la cantidad de calor necesaria a 1 gr. de agua, para pasar de t a θ . Por consiguiente, en virtud del 2º principio, se necesita el mismo número de calorías para calentar 1 gr. de agua de t a θ que de θ a t' .

Como el experimento se cumple, para cualquier valor de t y t' , resulta que, *para elevar en 1 grado la temperatura de 1 gramo de agua, se necesita 1 caloría sea cual fuere la temperatura a partir de la cual se ha empezado a calentar.* Sin embargo, experimentos exactos demuestran que la cantidad de calor necesaria para calentar 1 gramo de agua en 1º, varía un poco con la temperatura y pasa por un máximo de unos 40º. La caloría tal como la hemos definido, apenas difiere de algunas milésimas del calor necesario para calentar 1 gramo de agua de t° a $(t + 1)^\circ$, teniendo t un valor cualquiera comprendido entre 0º y 100º.

Corolario. — Si tenemos una masa de agua de m gramos; para elevar su temperatura de t° a t'° , es decir, en un número de grados igual a $t' - t$, hay que proporcionarle $m(t' - t)$ calorías.

265. **Calor específico de los cuerpos. — Capacidad calorífica.** — Si se mezcla un kilogramo de mercurio a 100º con un kilogramo de agua a 0º, se observa que la temperatura que se establece es sólo 3º; por tanto, como la temperatura del metal ha bajado 97º, la cantidad de calor que ha perdido no caliente más que 3º la masa de agua. El agua recibe pues, en *igualdad de masa*, 32 veces más calor que el mercurio, en una misma elevación de temperatura.

Sea Q el número de calorías necesario para elevar la temperatura de 1 gramo de un cuerpo de t° a t'° . Llamaremos *calor específico medio* C_t' entre t y t' al cociente

$$C_t' = \frac{Q}{t' - t}.$$

El calor específico medio de un cuerpo entre dos temperaturas es, pues, el número de calorías necesario para elevar, como término medio, la temperatura de 1 gramo del cuerpo, en 1º, entre dichas temperaturas.

La definición precedente se aplica al caso en que una de las temperaturas sea 0º.

En los sólidos, el experimento ha demostrado que el calor específico es *casi constante*, cualquiera que sea la diferencia de temperatura considerada; la designaremos por c .

Cantidad de calor necesaria para elevar, de t° a t'° ; la temperatura p gramos de un cuerpo de calor específico c . Siendo c la cantidad de calor necesaria para elevar 1º la temperatura de 1 gramo del cuerpo; para p gramos y para una elevación de temperatura $t' - t$ la cantidad de calor necesaria es pues.

$$Q = pc(t' - t).$$

Capacidad calorífica. — Se llama *capacidad calorífica* de un cuerpo el producto pc de su masa por su calor específico; o también *el número de calorías necesarias para elevar 1° la temperatura del cuerpo entero*.

La capacidad calorífica es igual a la masa de agua que, para calentarse, exige la misma cantidad de calor que el cuerpo. También se llama : *valor en agua* del cuerpo o *cuerpo reducido a agua*.

266. **Medida de una cantidad de calor cualquiera.** — **Calorímetro de agua.** — Para medir la cantidad de calor desprendida o absorbida por cualquier fenómeno, se produce este fenómeno en el seno de una masa de agua de m gramos, a la temperatura inicial t° .

La temperatura del agua aumenta o disminuyé, según que el fenómeno desprenda o absorba calor. Sea t' la temperatura final. La cantidad de calor recibida o cedida por el agua es $m(t' - t)$. Este número, en el cual deben hacerse ciertas correcciones que vamos a indicar, representa la cantidad de calor desprendida o absorbida por el fenómeno.

Por medio de este procedimiento, se determina, por ejemplo, el calor de combustión de un cuerpo. Se encierra éste, con oxígeno, en un vaso sumergido en agua (269). Por un procedimiento eléctrico se inflama el cuerpo. Las calorías que desprende aumentan la temperatura del agua y se mide este aumento de temperatura.

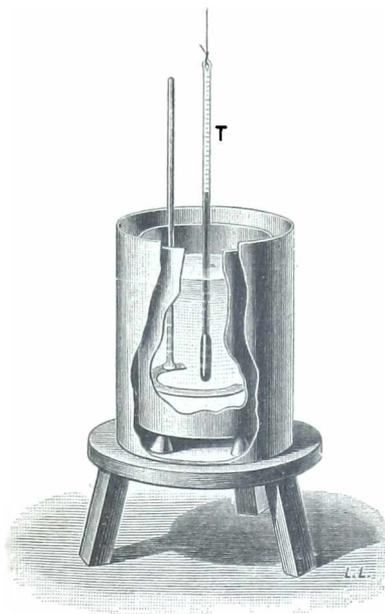


Fig. 285.

Aparato. — El aparato más sencillo usado para esta experiencia es un *calorímetro de agua* (fig. 285). Compónese de un vaso de latón o de plata, de paredes finas y pulimentadas, que descansa por medio de puntas de corcho, para evitar la pérdida de calor por conductibilidad, en el fondo de otro vaso pulimentado por dentro, que le protege contra la radiación; el primer vaso está lleno de agua y se introduce en él un termómetro, y con un agitador se iguala su temperatura en todos sus puntos.

Correcciones. — 1° Supongamos que el fenómeno que se estudia desprenda calor; a la cantidad de calor $m(t' - t)$ absorbida por el agua, hay que añadir el calor recibido por el vaso calorimétrico y por diversos cuerpos en él sumergidos : agitador, termómetro (que comprende el vidrio y el mercurio), etc. Sean $p, c; p', c'; p'', c''$, las masas y los calores específicos de los diversos cuerpos; absorben, éstos, un número de calorías $pc + p'c' + p''c'' + \dots$ ($t' - t$). Por consiguiente, la cantidad total de calor desprendido es :

$$Q = (m + pc + p'c' + p''c'' + \dots)(t' - t) = A(t' - t).$$

A representa la capacidad calorífica del calorímetro con el agua y los diversos cuerpos que contiene.

2° En todo experimento calorimétrico, hay calor cedido o cogido al exterior, por conductibilidad y por radiación, según que la temperatura del calorímetro sea superior o inferior a la temperatura ambiente.

En consecuencia hay que sustituir a t' , no por la temperatura final leída en el termó-

metro, sino por la temperatura que se hubiera producido si no hubiese habido ninguna pérdida ni ganancia de calor. Por lo tanto, debe hacerse una corrección en la temperatura que el termómetro indica; corrección que se reduce a un valor muy pequeño y, con frecuencia, despreciable en absoluto, cuidando, además, de que la elevación o el descenso de la temperatura del calorímetro sean pequeños. Se miden con termómetros sensibles *hasta la doscentésima de grado*.

267. Calorímetro de Berthelot. — Berthelot ha empleado en sus trabajos de termo-química, un calorímetro de agua perfeccionado (fig. 286).

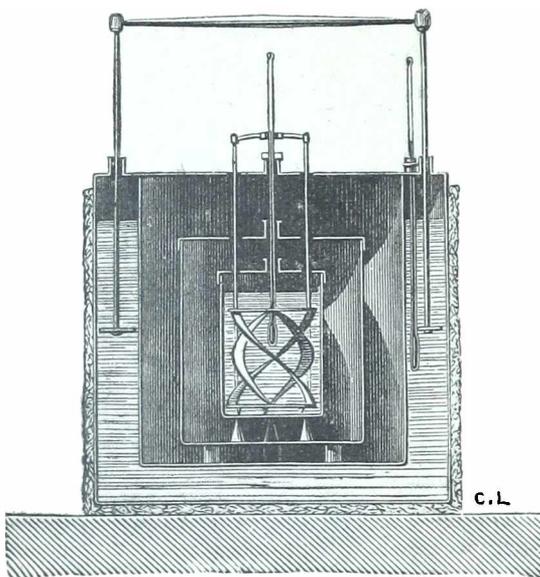


Fig. 286.

Compónese este aparato de un vaso que ordinariamente es de platino, de paredes muy finas, en forma de cubilete; tiene una tapadera, que está taladrada por diversas aberturas para el paso del termómetro, del agitador y de los tubos abductores de los gases o de líquidos.

Este vaso se coloca encima de tres conos de corcho, en el centro de un primer recinto, constituido por un cilindro de cobre rojo, muy delgado, plaqueado interiormente de plata pulimentada. El cilindro de cobre está cubierto por una tapadera del mismo metal, igualmente

plaqueada de plata y provista de aberturas que corresponden a las del calorímetro.

Este primer recinto se apoya sobre tres delgados redondeles de corcho, en el centro de un segundo recinto, constituido por un cilindro de paredes dobles de latón, entre las cuales se alojan de 10 a 40 litros de agua. Un agitador circular permite mover constantemente el líquido. Una tapadera de cartón, cubierta de estaño y taladrada por agujeros apropiados, cierra el orificio del cilindro. Toda esta envoltura exterior está cubierta de una camisa de grueso fieltro.

OBSERVACIÓN. — La adición de este recinto de agua tiene por efecto suprimir completamente el error debido al enfriamiento y a la calefacción, *cada vez que la duración de la experiencia no pase de algunos minutos y que los excesos de temperatura del calorímetro no pasen de 2°*. En los demás casos permite hacer las correcciones con precisión.

268. Método del calorímetro de hielo (de Bunsen). — El *calorímetro de hielo*, imaginado por Bunsen en 1870, se funda no en la absorción de calor, sino en la *contracción de volumen* que acompaña la fusión del hielo (279).

Compónese de un grueso tubo de vidrio, encorvado a manera de sifón

AB (fig. 287), cuya rama menor termina en forma de ancha cubeta cilíndrica. Esta se cierra por medio de un tubo o *mufla* de vidrio A, que penetra en ella y está soldado en todo su contorno : en esta mufla es donde se colocan solidos sometidos a medidas calorimétricas. Al tubo B se adapta otro horizontal D, graduado en partes de igual capacidad. El depósito se encuentra lleno de agua; lo restante del depósito, así como la rama mayor D el sifón y el tubo horizontal graduado que forman su continuación, están llenos de mercurio. El aparato, excepto el tubo graduado, está dentro de un recipiente lleno de hielo, que le mantiene a 0°.

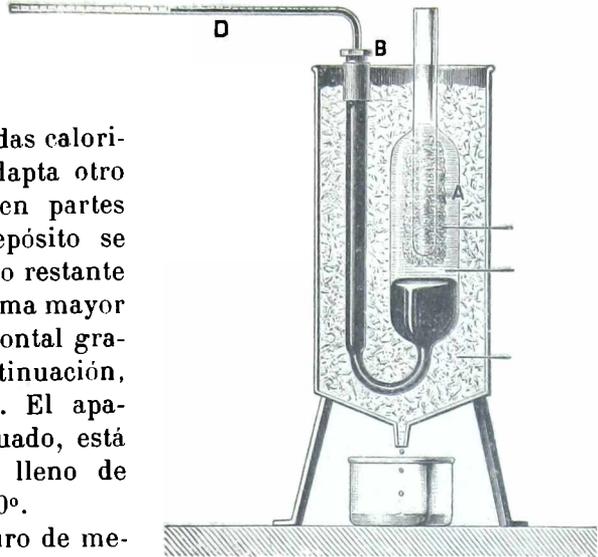


Fig. 287.

Haciendo evaporar cloruro de metilo dentro de la mufla se produce una capa de hielo más o menos espesa en torno de este tubo.

Se empieza por graduar en *calorías* el tubo graduado. Se echa en el vaso A una masa *m* de agua a temperatura conocida *t*. Esta agua se enfría hasta 0° en contacto de la capa de hielo y le cede *mt* calorías. Este calor se gasta en fundir parte del hielo. De aquí resulta una contracción que hace subir el nivel mercurial en D cierto número de grados *n'*. De ahí se deduce que *n'* grados del tubo graduado corresponden a *mt* calorías, y que, en consecuencia, 1 grado de este tubo corresponde a $\frac{mt}{n'} = \alpha$; α es la *constante del aparato*.

Operación. — Una vez que la columna mercurial vuelve a quedar fija se proyecta rápidamente en la mufla A el cuerpo sometido a la experiencia, y se observa la marcha del mercurio en D. Sea *n* el número de grados que la columna varía : la variación de las calorías es evidentemente igual a *n* α . Si la columna ha retrocedido, es que ha habido desprendimiento de calor. Si la columna ha avanzado, es que ha habido *absorción de calor*.

269. *Calor desprendido por las reacciones químicas. — Calor de combustión.* — Los métodos calorimétricos que proceden pueden servir para medir la cantidad de calor desprendida en las reacciones químicas y, especialmente, en la combustión.

Llámase *calor de combustión* de un cuerpo a la cantidad de calor que se desprende en la combustión de la unidad de masa del mismo. Así el de 1 gr. de hidrógeno que arde en el oxígeno es de 31.500 cal. cuando el agua formada toma el estado líquido. En general, la misma definición se aplica a los *calores de reacción*.

Varios físicos, y en particular Lavoisier, Rumford, Despretz, Dulong, Hess, Silbermann y Fabre, Berthelot, se han ocupado en medir los calores de combustión y de reacción. Hoy se utilizan generalmente los calorímetros de Berthelot para este género de trabajos.

En el caso de las reacciones por vía húmeda, como son, por ejemplo, las reacciones de los ácidos sobre las bases, se meten directamente en el vaso calorimétrico los cuerpos estudiados y su calor de reacción se deduce de la observación de su temperatura final y del conocimiento de los calores específicos de los productos de la reacción.

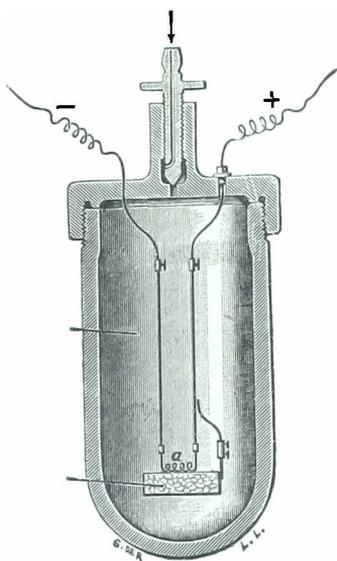
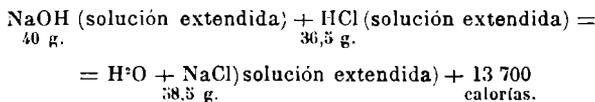
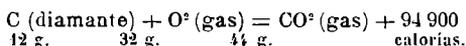
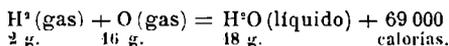
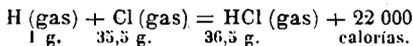


Fig. 288.

Bomba calorimétrica. — Para las reacciones por vía seca, sobre todo para la medida de los calores de combustión, se puede emplear la bomba calorimétrica de Berthelot.

Este aparato, bastante pequeño para poder ser sumergido en el agua de un calorímetro (fig. 288), está formado por un depósito de acero forrado interiormente con una hoja de platino, y que puede cerrarse con una tapadera de tornillo. En su centro y perpendicularmente a su plano la tapadera lleva un tubo dentro del cual puede dar vueltas una llave de tornillo cuyo canal se ve en la figura. En caso de que el cuerpo por quemar sea un gas, se llena la bomba de una mezcla de oxígeno y de gas. Junto a este tubo hay un alambre de platino, perfectamente aislado del aparato, que penetra dentro de la cavidad y va a terminar cerca de la pared. Gracias a él se puede provocar la chispa eléctrica que deberá provocar la reacción por vía seca, cuyo desprendimiento de calor se quiere medir. Si se quema una materia sólida, por ejemplo carbono, se le coloca en una pequeña cápsula de platino colgada por un alambre metálico y se determina su inflamación por el paso de una corriente a través de un alambre de platino muy delgado puesto en contacto con el cuerpo. Para que la combustión sea completa, es necesario llenar la bomba con un exceso de oxígeno comprimido a la presión de unas 25 atmósferas.

He aquí, los calores desprendidos en algunas reacciones químicas importantes :



270. Medida de los calores específicos de los sólidos y líquidos. — Generalmente, el calor específico de un sólido o de un líquido se mide por el método del calorímetro de agua que se denomina también *método de las mezclas* y que fué inventado por Black.

Para esto, se introduce el cuerpo, de masa P gramos, en un recipiente especial, colocado alrededor de un tubo en el cual circula el vapor de un líquido apropiado a la temperatura T a que se quiere someter el cuerpo *. Luego transportase rápidamente este cuerpo a un calorímetro que contiene M gramos de agua a t°. Se nota la temperatura final t'.

* A menudo, se emplea vapor de agua hirviendo procedente de una caldera. En este caso, la temperatura T = 100°.

Como la cantidad de calor perdida por el cuerpo es igual a la ganada por el agua, tenemos :

$$Pc(T - t') = M(t' - t),$$

de donde se extrae el valor de c .

OBSERVACIÓN. — En realidad, para medidas de precisión, este método necesita las correcciones que ya hemos indicado (266). En la ecuación final, en vez de M hay que introducir la capacidad calorífica total A del calorímetro y de su contenido. Además, si el cuerpo se halla, a su vez, en algún envase, lo cual es indispensable para los líquidos, hay que añadir al factor Pc la capacidad calorífica de este envase. Finalmente, pueden necesitarse correcciones relativas a la pérdidas de calor por conductibilidad y radiación.

Empleo del calorímetro de hielo. — Los P gramos del cuerpo a la temperatura T quedan en el tubo del calorímetro, donde, enfriándose a 0° pierden PcT calorías. Se ve que el mercurio retrocede n divisiones, en el tubo graduado. Luego, si llamamos α a la constante del aparato, tendremos :

$$PcT = \alpha n, \quad \text{de donde} \quad c = \frac{\alpha n}{PT}.$$

Resultados generales de las medidas. — 1°. Los calores específicos de los diversos cuerpos son inferiores al del agua, es decir a 1.

2°. El calor específico varía, dada la misma sustancia, con su estado molecular. Así, el calor específico del *diamante* es 0,15; el del *grafito*, 0,20.

3°. Dada una misma sustancia, el calor específico varía con su estado físico : en general *es mayor en estado líquido*, que en *el sólido*. Por ejemplo, el calor específico del hielo es *mitad* que el del agua. El de un gas es también más pequeño que el del líquido generador.

4°. El calor específico es variable, dada una misma sustancia, según los límites de temperatura entre las que se la ha medido.

En los cuerpos sólidos, la variación es despreciable entre 0° y 100° ; es grande y va creciendo para las temperaturas superiores a 100° . Es tanto mayor cuanto más se acerca el cuerpo sólido a su punto de fusión.

En los líquidos, la variación con la temperatura es más acentuada aún. La mayor parte de ellos tienen un calor específico que ni siquiera entre 0° y 100° es constante.

En el agua son mucho más pequeñas las variaciones : pero no *nulas*, según supusimos anteriormente.

Experimentos de M. Violle. — *Aplicación a la termometría calorimétrica.* — M. Violle ha determinado estos dos calores específicos para el platino, a diversas temperaturas, utilizando el método de las mezclas. Un termómetro de gas y un vaso de porcelana sin esmaltar que contienen una masa conocida de platino se introducen en la misma mufla de un hornillo de gas. Cuando la temperatura queda estacionaria a T° , la masa de platino es introducida en un cilindro que se baña en el agua de un calorímetro. Una medida calorimétrica da a conocer el *calor específico medio* del platino para el intervalo $0^\circ - T^\circ$

Haciendo variar T , reconoció M. Violle que el calor específico medio del platino podía calcularse por la fórmula siguiente :

$$[1] \quad C \frac{T}{0} = 0,0317 + 0,000006T.$$

Inversamente, la fórmula [1] permite, mediante la determinación directa de C_0^T , calcular el intervalo de temperatura T° .

La fórmula es legítima en un intervalo comprendido entre 0° y 1200° . Así es cómo M. Violle fijó la escala de las temperaturas elevadas que sirvo en las medidas pirométricas.

5º-Valores de algunos calores específicos :

Plomo.	0,031	Vidrio blanco do.	0,16 a 0,19
Mercurio	0,033	Bencina	0,43
Cobre	0,09	Petróleo	0,50
Hierro.	0,11	Alcohol	0,60

271. **Leyes relativas a los calores específicos de los átomos.** — Las leyes siguientes interpretan importantes relaciones que existen entre los calores específicos de los cuerpos y su constitución química.

1º *Ley de Dulong y Petit.* — *El producto cP del calor específico de un cuerpo simple en estado sólido por su peso atómico es un número casi constante que varía de 5,9 a 6,8.*

A pesar de estas diferencias notables, la ley de Dulong y Petit es de las más importantes. Significa que *todos los átomos de los cuerpos simples tienen la misma capacidad calorífica.*

2º *Ley de Wæstyn.* — *La capacidad calorífica de un cuerpo compuesto es igual a la suma de las capacidades caloríficas de cada uno de sus elementos.*

Si se considera por ejemplo un compuesto de la forma $A^a B^b D^d$, cuyo calor específico es C , y si c, c', c'' son los calores específicos de los elementos A, B, D , la ley de Wæstyn permite escribir :

$$(A^a B^b D^d)C = aAc + bBc' + dDc''.$$

Esta ecuación ha sido demostrada experimentalmente por Regnault en gran número de casos. También es exacta para las aleaciones.

CALORES ESPECÍFICOS DE LOS GASES

272. **Definiciones.** — En cada gas, hay que considerar dos coeficientes : el calor específico a *presión constante* y el calor específico o *volumen constante*.

Calor específico *a presión constante* es la cantidad de calor que necesita 1 gr. de gas para elevar su temperatura de 0° a 1° , dejándole dilatarse libremente, bajo presión constante. En el aire, este coeficiente C es igual a 0,2347.

Calor específico *a volumen constante* es la cantidad de calor necesaria para elevar de 0° a 1° , la temperatura de 1 gr. de gas, manteniendo su volumen *constante*. En el aire, este coeficiente c es igual a 0,169.

Se comprende que c sea menor que C en virtud del esfuerzo que se necesita para mover la presión atmosférica en caso de calentamiento a presión constante.

Por los experimentos, no se puede determinar directamente sino el calor específico de C a presión constante. El coeficiente c se determina indirectamente.

273. **Determinación del calor específico de los gases (bajo presión**

constante). — *Experimentos de Regnault*. — Este coeficiente ha sido determinado por Regnault, aplicando directamente el método de las mezclas a los gases, con ciertas modificaciones que exige el estado físico de estos cuerpos.

Hacia pasar una masa M de gas a un serpentín sumergido en un baño a temperatura T . El gas circulaba en seguida por una serie de cajas sumergidas en un calorímetro de agua a temperatura inicial θ . Sea θ' la temperatura final del calorímetro. Todo ha pasado como si el gas entero se hubiera enfriado de T a la temperatura media $\frac{\theta + \theta'}{2}$. En consecuencia, si se llama M' la masa de agua del calorímetro, aumentada con los accesorios *reducidos al agua*, la ecuación del experimento será :

$$[1] \quad M \left[T - \frac{\theta + \theta'}{2} \right] = M' (\theta' - \theta),$$

salvo las correcciones referentes a la pérdida por conductibilidad y a la radiación.

Resultados generales. — Regnault determinó por este método los calores específicos de los principales gases, entre 0° y 200° y bajo presión constante, próxima a una atmósfera.

Para todos ellos encontró calores específicos muy inferiores a 1, menos el del hidrógeno, que es superior a 3. El más pequeño es el del cloro, igual a 0,121.

También observó Regnault que para los gases considerados en condiciones distantes de su punto de licuefacción, el calor específico es independiente de la presión constante, así como de los límites de temperatura. Por ejemplo : el del aire es rigurosamente constante desde -30° hasta 225° .

Regnault confirmó además la ley siguiente enunciada por Delaroche y Berard :

La capacidad calorífica de volúmenes iguales de diversos gases simples, tomados en iguales condiciones de temperatura y presión, es constante.

Siendo las masas de volúmenes iguales de diversos gases proporcionales a las densidades de estos gases con relación al aire, la ley enunciada tiene como corolario el siguiente :

El producto del calor específico de un gas por su densidad es constante.

274. **Determinación de $\frac{C}{c}$** . — Se puede determinar directamente, para un gas, la relación $\frac{C}{c}$. Conociendo C , se deducirá el valor de c .

I. *Estudio de las transformaciones de una masa de gas*. — De las tres variables, presión, volumen, temperatura, de que depende el estado de una masa, sólo dos son arbitrarias; pues el tercero es determinado por la igualdad [1] $pv = RT$ (258).

1º *Caso general*. — Supongamos que se pasa del estado definido por los valores p, v, T de las variables al estado definido por los valores $p + \Delta p, v + \Delta v, T + \Delta T$. Tendremos :

$$(p + \Delta p)(v + \Delta v) = R(T + \Delta T)$$

que, teniendo en cuenta la ecuación fundamental [1] y despreciando el producto $\Delta p \Delta v$, que es infinitamente pequeña de segundo orden, pasa a ser :

$$[2] \quad v \Delta p + p \Delta v = R \times \Delta T.$$

Tal es la relación que existe entre las tres variaciones Δp , Δv , ΔT ,
 2º Casos particulares. — v permanece constante : se tiene

$$[3] \quad \Delta v = 0 \quad \text{con} \quad \Delta T' = \frac{v}{R} \Delta p.$$

p permanece siendo constante : se tiene

$$[4] \quad \Delta p = 0 \quad \text{con} \quad \Delta T'' = \frac{p}{R} \Delta v.$$

3º Ecuación general de la variación de calor. — Tomemos ahora p y v como variables independientes : supongamos que el paso del estado (p, v) al estado $(p + \Delta p, v + \Delta v)$ (que podemos suponer tan inmediato al primero como queramos) se efectúe en dos tiempos. Primeramente, el volumen se mantiene constante, el gas pasa del estado (p, v)

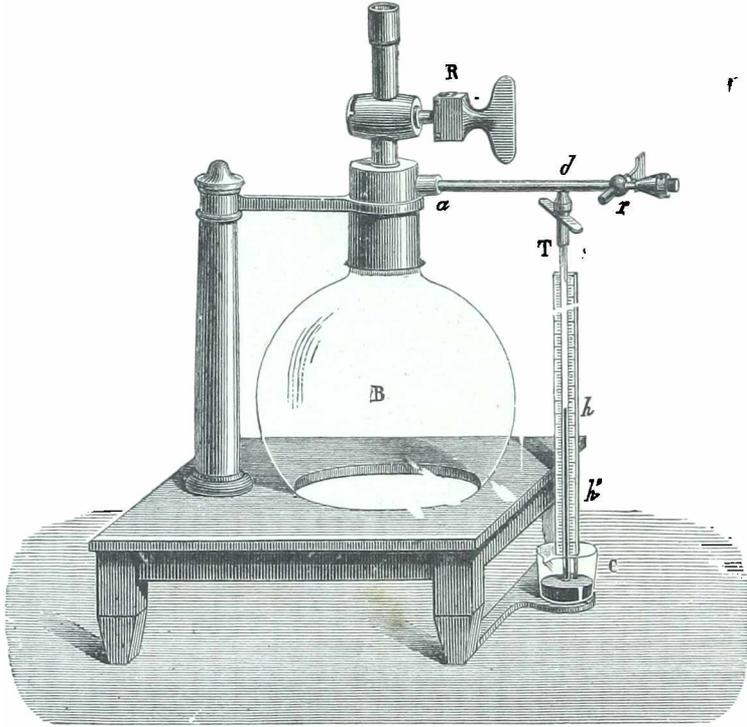


Fig. 289.

al estado $(p + \Delta p, v)$; y después, conservando en adelante la presión el valor $p + \Delta p$, el volumen varía y adquiere el valor $v + \Delta v$.

En el primer tiempo se tiene $\Delta v = 0$, y la variación de la temperatura de la unidad de masa de gas determinada por la ecuación [3] y el aumento de calor, dado volumen constante, es $v\Delta T'$, quiere decir, $c \frac{v}{R} \Delta p$.

En el segundo tiempo la variación de temperatura es definida por la ecuación [4], y el aumento de calor, a presión constante, es $C\Delta T''$, o $C \frac{p}{R} \Delta v$.

En resumen, para hacer pasar el gas del estado inicial al final, se ha necesitado suministrar a la unidad de masa la cantidad de calor total :

$$[5] \quad \Delta Q = c \frac{v}{R} \Delta p + C \frac{p}{R} \Delta v.$$

La fórmula [5] es aplicable a todas las transformaciones.

II. Caso de una transformación adiabática. — Experimento llamado de Clement y Desormes. — Cuando el sistema gaseoso está térmicamente aislado del exterior, de modo que no

irradie ni reciba calor, se dice que sufre una transformación *adiabática* (314). En este caso la variación de calor es nula y la igualdad [5] da, haciendo en ella $\Delta Q = 0$,

$$0 = cv \Delta p + Cp \Delta v.$$

de donde

$$[6] \quad \frac{C}{c} = -\frac{v \Delta p}{p \Delta v} = -\frac{v}{\Delta v} \cdot \frac{\Delta p}{p}.$$

Se ha aplicado esta ecuación a los resultados de ciertos experimentos hechos por dos manufactureros Desormes y Clement con otro objeto muy diferente, los cuales se conocen con el nombre clásico de *Experimentos de Clement y Desormes*.

Introdúcese en un matraz B de volumen invariable (fig. 289) una masa de gas; la presión es $H - h$ y la temperatura t (H es la presión atmosférica dada por un barómetro en el momento del experimento; h es una descompresión previa, medida por la ascensión de una columna de ácido sulfúrico en el tubo recto CT). Si entonces se abre la ancha llave R para cerrarla en seguida, penetra en el recinto B cierta masa del aire exterior, según haría un émbolo y comprime el gas interior. De ahí resulta que si se considera la *unidad de masa* de este gas, que era primero en el estado

$$[I] \quad v, \quad H - h, \quad t,$$

esta masa se calienta y pasa al estado

$$[II] \quad v - \Delta v, \quad H, \quad t + \Delta t.$$

En efecto, obsérvase inmediatamente después de cerrada la llave, que la columna de ácido sulfúrico baja hasta hacerse nula.

Después se enfría la masa interior recobrando la temperatura ambiente. Entonces, la presión disminuye y el líquido sube de nuevo en el tubo CT hasta la altura h' . El estado final de la unidad de masa del gas es pues de

$$[III] \quad v - \Delta v, \quad H - h', \quad t,$$

Como el paso de [I] a [II] se ha efectuado adiabáticamente por razón de su instantaneidad, puede aplicarse a esta transformación la ecuación (6) : tiénese pues

$$\frac{C}{c} = \frac{v}{\Delta v} \frac{h}{H - h}.$$

La variación de volumen Δv está dada aplicando la ley de Mariotte a los estados [I] y [III] que corresponden a la misma temperatura :

$$\frac{H - h}{H - h'} = \frac{v - \Delta v}{v} = 1 - \frac{\Delta v}{v};$$

de donde

$$\frac{v}{\Delta v} = \frac{H - h'}{h - h'}$$

y por consiguiente

$$\frac{C}{c} = \frac{h}{H - h} \cdot \frac{H - h'}{h - h'}.$$

Y, observando que el cociente $\frac{H - h'}{H - h}$ es sensiblemente igual a la unidad, por ser h y h' cantidades muy pequeñas respecto de H , resulta en fin :

$$\frac{C}{c} = \frac{h}{h - h'}.$$

Resultados. — Sustituyendo h y h' en esta fórmula por los resultados brutos de las medidas de Desormes y Clément, Laplace encontró el número 1,354.

Sobre el principio de estos experimentos fundaron varios físicos métodos de medida de $\frac{C}{c}$ especialmente Gay-Lussac y Welter, Assmann, Masson, Kohlrausch, W. C. Röntgen y Regnault. Estos experimentos han dado números muy diferentes, que varían desde 1,372 hasta 1,405 (experimentos de Röntgen).

La divergencia es aún mayor si se comparan estos números con los obtenidos por otros métodos fundados, uno en el conocimiento del equivalente mecánico del calor; otro en la medida de la velocidad del sonido en el gas estudiado.

Esto prueba lo importante que era repotir estas medidas por medio de una combina-

ción experimental más precisa. Y esto es lo que hoy se ha hecho siguiendo un método nuevo, cuyo principio y combinación experimental damos a continuación*.

Experimentos de M. G. Maneuvrier. — La fórmula [5] da para una transformación adiabática:

$$[5] \quad \frac{C}{c} = - \frac{\Delta p}{p} \cdot \frac{\Delta v}{v}.$$

M. G. Maneuvrier ha imaginado y aplicado un método que permite calcular *directamente* la compresión $\frac{\Delta v}{v}$ y la variación relativa correspondiente $\frac{\Delta p}{p}$ de la presión del gas.

La masa gaseosa está contenida en un matraz B de unos 50 litros (fig. 290 y 291) en el cual ocupa el volumen arbitrariamente elegido $v + \Delta v$ bajo la presión p a la temperatura t . En otro matraz B' unido al anterior por medio de un tubo M provisto de una llave r' se establece una presión $p + \Delta p$ calculada por un barómetro y el manómetro sen-

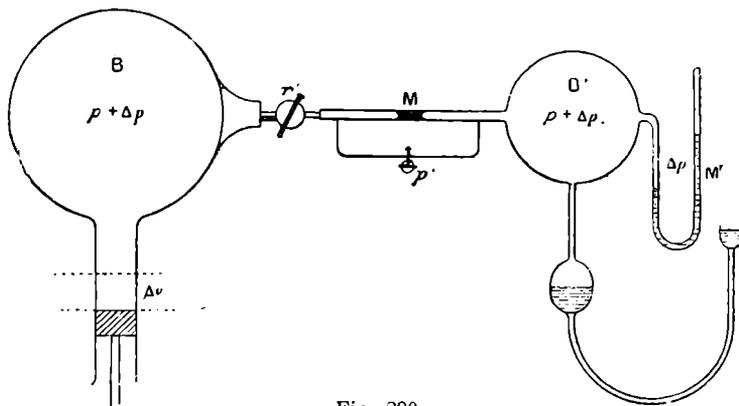


Fig. 290.

sible M'. Un émbolo movable en el cuerpo de bomba cilíndrico C, adaptado al cuello del matraz B, puede producir, mediante el escape de un resorte R por ejemplo, una compresión brusca del gas.

Si Δv es la disminución de volumen obtenida de este modo, el gas no ocupa ya más que el volumen v , y esto bajo una presión igual a $p + \Delta p$ si se ha elegido *adecuadamente* el exceso inicial de presión Δp . Obtiene fácilmente Δp : si, en efecto, el émbolo hace funcionar la llave r' por medio de una corriente eléctrica, por ejemplo, poniendo así *un instante* en comunicación los dos recipientes B y B' en el momento preciso en que debe ocupar la posición extrema requerida, la indicación del manómetro M' permanecerá invariable si se ha logrado el arreglo deseado; en el caso contrario habrá cambio de gas en el sentido que se quiere; de modo que será posible observar el equilibrio después de dos o tres ensayos. Medidas fáciles de imaginar dan v y Δp , el barómetro da p y el manómetro Δp , medidas que figuran en la fórmula.

El experimento se hace con una masa de gas que nunca entra en contacto con la atmósfera; la compresión es seguramente adiabática; y como toda la operación se reduce a poner de manifiesto un equilibrio, que es cosa de poco tiempo, no hay que cuidarse de las variaciones que sobrevienen en la presión y en la temperatura ambiente.

OBSERVACIÓN. — En realidad el autor ha tenido en cuenta en el cálculo $\frac{C}{c}$ la diferencia de compresibilidad que presentaban en las condiciones del experimento los gases que ha estudiado.

Resultados. — El autor ha aplicado su método y su aparato al examen de 4 gases: el aire, el anhídrido carbónico y el hidrógeno y últimamente el acetileno**.

* Véanse los detalles de estos experimentos en una Memoria de G. Maneuvrier: *Nuevo Método de determinación de la razón $\frac{C}{c}$ para el aire y otros gases* (Tesis de doctorado, Gautier-Villars e hijo, 1895).

** El número relativo al acetileno ha sido determinado con la colaboración de M. J. Fournier.

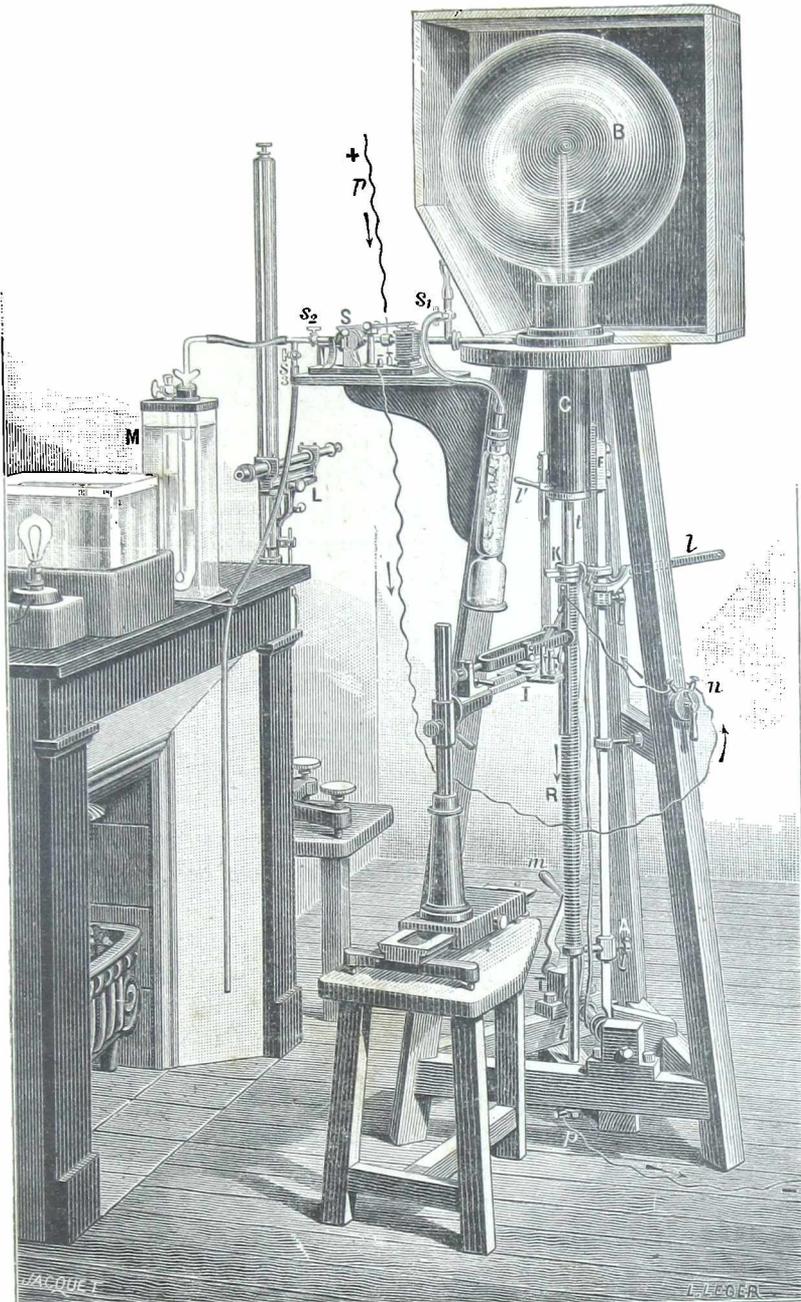


Fig. 291.

Los resultados que ha encontrado son los siguientes :

Aire	$\gamma = \frac{C}{c} = 1,3924^*$	} En las condiciones ordinarias de temperatura y de presión.
Anhídrido carbónico	1,298	
Hidrógeno	1,384	
Acetileno	1,260	

* Para el aire se ha deducido $c = \frac{C}{\gamma} = 0,1687$.

OBSERVACIÓN. — El método y el aparato son aplicables tal como son, a todas las sustancias que se pueden obtener en estado gaseoso en las mismas condiciones.

Para buscar la influencia de la temperatura sobre el valor de γ y para estudiar los vapores, no habría más que reemplazar por una estufa el circuito de aislamiento del matraz B.

Para buscar la influencia de la presión, bastaría dar al aparato las modificaciones de construcción que requiere el empleo de altas presiones.

CAPÍTULO V

FUSIÓN Y SOLIDIFICACIÓN

275. **Leyes de la fusión. — Calor de fusión.** — Casi todos los cuerpos sólidos, al calentarse, se transforman en líquidos*. Este fenómeno se denomina *fusión*. Ciertos cuerpos, como el vidrio, el hierro, antes de fundirse, se reblandecen y pasan por todos los estados intermedios entre el sólido y el líquido. Se dice que sufren la fusión pastosa o vidriosa. Pero, en los demás cuerpos, el paso del estado sólido al líquido se efectúa sin estados intermedios. Es la fusión *franca* y está sometida a las leyes siguientes :

1º *Dada una presión constante, todo cuerpo entra en fusión a una temperatura determinada e invariable para cada sustancia; esa temperatura se llama su punto de fusión.*

2º *Desde que empieza la fusión de un cuerpo, la temperatura deja de subir y permanece igual al punto de fusión hasta que aquélla sea completa.*

Cuando se dispone de una masa notable del cuerpo que se trata de examinar, caliéntasela directamente en un vaso adecuado y se introduce el depósito de un termómetro (bien calibrado y exacto) en la sustancia que se funde. Tómase nota del punto de parada de la columna mientras dura el cambio de estado, y se observa : 1º que este punto de parada es siempre el mismo para una sustancia dada, químicamente definida; es el *punto de fusión*; 2º que este punto de parada es constante mientras quedan sin fundir partículas de la sustancia.

Cuando sólo se tiene escasa cantidad de sustancia, hay que proceder de otro modo. Introdúcense algunos miligramos de ella en un tubo afilado, casi capilar y de paredes delgadas (fig. 292) y se tiene cuidado de establecer el contacto del cuerpo con la pared interna del tubo por una fusión previa seguida de enfriamiento. El tubo así preparado se fija en el vástago de un termómetro, de modo que la bola de éste quede a la altura de la masa solidificada, y se introduce todo el sistema en un vaso que contiene *agua* o *parafina* según la temperatura que se trata

* Muchos cuerpos, antes de fundirse, sufren una descomposición química por la acción del calor. En este caso se hallan numerosos compuestos de metales y metaloides y la mayoría de las sustancias orgánicas.

de alcanzar. Caliéntase gradualmente, agitando poco a poco el líquido con el sistema, y se observa el punto en que la masa concrecionada se liquida y se vuelve transparente. Esta temperatura da el punto de fusión.

Calor de fusión. — Según la segunda ley, todo el calor comunicado al cuerpo durante la fusión no produce ningún aumento de temperatura : de donde se deduce que es consumido por la fusión.

Llámase, generalmente, *calor de fusión* de un cuerpo el número de calorías necesarias para fundir un gramo de este cuerpo sin aumento de temperatura.

Por ejemplo, un gramo de hielo absorbe para fundirse unas 80 calorías. Luego el *calor de fusión* del hielo es 80.

276. Solidificación : definición y leyes. — Hemos visto que la *solidificación* es el paso del estado líquido al sólido. Este fenómeno se encuentra sometido a dos leyes, que son recíprocas de las de la fusión y que se demuestran de la misma manera.

1º *La solidificación se produce para cada cuerpo a una temperatura fija que es precisamente, la de fusión.*

2º *Desde el momento en que empieza la solidificación hasta que termina completamente, la temperatura permanece constante.*

Esta segunda ley prueba que el calor que el cuerpo absorbe al fundirse, lo restituye al solidificarse. Se admite que el calor restituído durante la solidificación es rigurosamente igual al que desaparece durante la fusión.

277. Sobrefusión. — Llámase *sobrefusión* al fenómeno del descenso del punto de solidificación. Se le ha observado primero en el agua.

Experimentos de Gay-Lussac. — Gay-Lussac puso una probeta de agua destilada en una mezcla frigorífica (335) y habiendo colocado todo debajo del recipiente de la máquina neumática, a fin de que el aire disuelto se desprendiese, el agua descendió hasta por bajo de -12° sin solidificarse. Pero al imprimir entonces a la masa una ligerísima sacudida, la congelación sobrevinía inmediatamente, a la vez que la masa líquida volvía a subir a cero.

Experimentos de M. Gernez. — M. Gernez efectuó sobre este interesante punto multitud de experimentos, muy ingeniosos. El azufre, que se funde y se solidifica a 114° , permanece *sobrefundido* hasta la temperatura ordinaria cuando se enfría lentamente y en reposo.

Análogamente, el fósforo, que se solidifica a 44° , permanece líquido hasta 22° en el agua perfectamente tranquila.

En todos los líquidos sobrefundidos, la sobrefusión cesa cuando se los toca con una partícula del cuerpo solidificado,

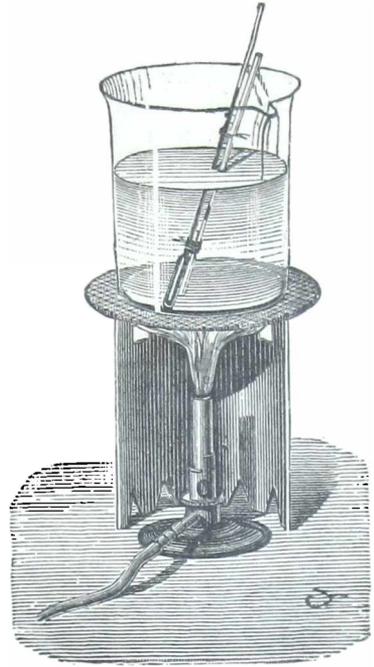


Fig. 292.

278. Cristalización. — En general, los cuerpos que pasan *lentamente* del estado líquido al sólido afectan formas geométricas determinadas (tetraedros o cubos, prismas, romboedros, etc.) que se llaman *cris-tales*.

Si por ejemplo, se deja enfriar azufre fundido en un crisol, la solidificación comienza en las paredes del crisol que estén expuestas directamente al frío. Si antes de que sea completa la solidificación se retira la parte aún líquida, se ven largas agujas prismáticas de azufre pegadas a las paredes del crisol.

Hielo cristalizado. El agua cristaliza cuando se hiela : esta cristalización se manifiesta en copos de nieve y en las figuras de helechos arborescentes que se ven en los cristales de las ventanas, en invierno, cuando se congela en ellos el vapor de agua. En un trozo de hielo, la estructura cristalina no es aparente por causa del cruzamiento y soldadura de los cristales.

Sistemas cristalinos. — Los cuerpos, al cristalizar, adoptan formas muy variadas. Pero, pueden reducirse a un corto número de formas tipos. Todos los cristales que se relacionan con una misma forma tipo pertenecen al mismo *sistema cristalino*. Existen siete sistemas cristalinos : el *cúbico*, el *cuadrático*, o *prismático recto de base cuadrada* ; el *ortorrómbico* o *prismático recto de base rectangular o rómbica* ; el *clinorrómbico* o *monoclinico*, cuya forma tipo es un prisma en que cada arista lateral es perpendicular a una de las dos aristas que corta en la base y oblicua a la otra ; el *triclinico* o *anórtico* que tiene por tipo un prisma en el cual las tres aristas que forman un mismo triedro no dan lugar a ningún ángulo recto ; el *exagonal*, cuya forma tipo es un *prisma exagonal recto*, y el *romboédrico* cuyo tipo es un *romboedro*.

279. Cambios de volumen debidos a la fusión y a la solidificación. — **Fuerza expansiva del hielo.** — La mayor parte de los cuerpos, al pasar del estado sólido al líquido, aumentan de volumen. Hecho es éste que se observa fácilmente, porque la densidad del sólido es entonces mayor que la del líquido, y, consecuentemente, durante la fusión, los trozos del cuerpo todavía sólido quedan en el fondo del líquido. Esto es lo que ocurre con el plomo, el azufre, etc. Por el contrario, en el momento de la congelación, el agua aumenta de volumen y el hielo sólo tiene una densidad igual a 0,930 : esta es la razón por qué flota en la superficie del agua. Ya hemos visto (268) cómo se utiliza esta propiedad en el calorímetro de hielo de Bussen. He aquí otras consecuencias.

Si se pone a congelar agua en un vaso cerrado, el hielo desarrolla, al formarse, una fuerza expansiva considerable que rompe el vaso. Ciertas piedras se resquebrajan después de la helada, porque el agua que penetra en sus poros se ha dilatado al congelarse.

El hierro colado, el bismuto, el antimonio, presentan el mismo fenómeno.

280 Influencia de la presión exterior sobre la temperatura de fusión. — Para los cuerpos que *se dilatan* pasando del estado sólido al líquido y que *se contraen*, en el paso inverso, — que es el caso más general, — la presión exterior es un obstáculo al aumento de volumen y y el aumento de presión eleva la temperatura de fusión.

Por el contrario, tratándose de las sustancias que *se contraen* al pasar

del estado sólido al líquido, la presión exterior debe tener efectos opuestos: el aumento de presión baja la temperatura de fusión.

Ciertas consideraciones teóricas indujeron hace ya mucho tiempo a James Thomson, a admitir esa doctrina que fué confirmada por experimentos directos de lord Kelvin.

Experimentos de lord Kelvin. — Lord Kelvin comprimió hielo en una especie de piezometro (226) y observó que el punto de fusión baja de una manera continua de unos $0^{\circ}.0075$ por atmósfera.

Experimentos de Amagat. — Inversamente, Amagat obtuvo la solidificación propia-



Fig. 293.

mente dicha de varios líquidos por medio de la presión, valiéndose de un aparato especial.

El líquido contenido en un cilindro de acero recibe la presión por medio del mercurio; el cilindro lleva en el mismo eje, uno frente a otro, dos miradores muy resistentes formados por dos pequeños cilindros de cuarzo; un haz luminoso atraviesa esos miradores, y va a incidir sobre un antejo que permite observar el fenómeno de la solidificación.

Varios cuerpos toman, al solidificarse en estas condiciones, una forma cristalina perfectamente definida; los cristales que van a depositarse en la cara interna de los miradores pueden ser proyectados y fotografiados. La figura 293 es la reproducción de fotografías obtenidas de esta manera por Amagat con el cloruro de carbono, desconocido hasta entonces en estado sólido, bajo presiones que llegaban a 1 200 atmósferas.

Con el agua produjo Amagat el fenómeno inverso; el líquido congelado se liquida bajo la presión, formándose cristales cuando se afloja lentamente (fig. 294).

Por los movimientos de los cristales se puede observar el hecho no menos instructivo

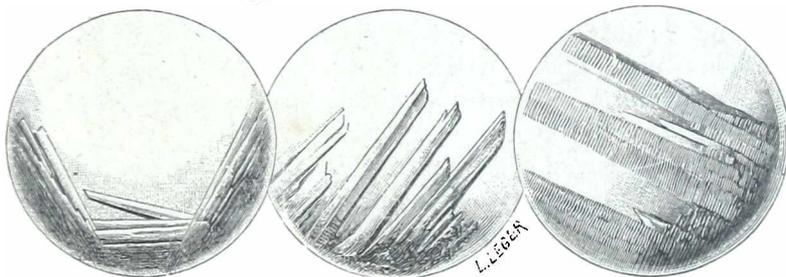


Fig. 294.

do que en este último caso los cristales son menos densos que el agua líquida, mientras que ocurre lo contrario si se les obtiene por compresión.

Estos experimentos no son únicamente cualitativos, pues permiten determinar la presión bajo la cual se produce el cambio de estado a cada temperatura.

Experimentos de M. Tammann. — Tammann estudió, en un gran número de cuerpos, la ley de variación del punto de fusión con la presión, hasta presiones de 3 000 atmósferas, y confirmó que cuando el paso del estado sólido o mejor dicho, del estado cristalino, al estado líquido, se produce con aumento de volumen*, el punto de fusión se eleva

* El agua y el bismuto son los únicos que hacen excepción a esta regla.

primero al mismo tiempo que la presión. Pero consideraciones fundadas en la termodinámica y en la compresibilidad de los líquidos y sólidos han inducido a M. Tammann a pensar que el punto de fusión debe pasar por un máximo cuando la presión aumenta. De todos modos, sólo ha podido obtener este máximo en la sal de Glauber.

Diagramas. — Los resultados de esos experimentos se pueden traducir por una curva

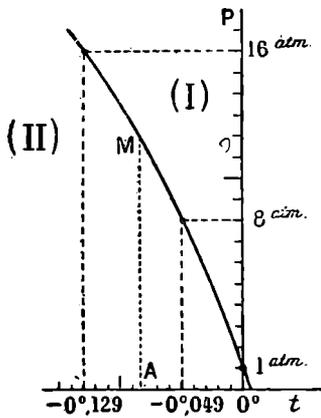


Fig. 295.

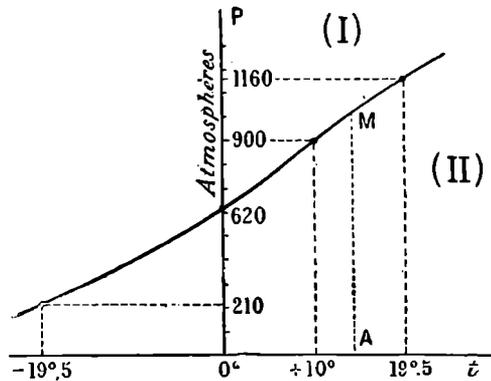


Fig. 296.

obtenida representando como abscisas las temperaturas de fusión y como ordenadas las presiones correspondientes. Las fig. 295 y 296 representan respectivamente las *curvas de fusión* del hielo, deducidas de los experimentos de lord Kelvin, y del cloruro de carbono, deducida de los experimentos de Amagat.

281. Rehielo. — Apretando dos pedazos de hielo uno contra otro se adhieren; en los puntos que se tocan el hielo se funde por la presión y el líquido se esparce por los intesticios donde no se ejerce la presión. Se congela porque la temperatura, en el centro del pedazo de hielo, es siempre inferior a 0° .

Tyndall ha demostrado que se puede moldear una masa de hielo, sometiéndola a una presión bastante grande. Si se la comprime en un molde, hay primero ruptura en fragmentos más pequeños, que en seguida se sueldan unos con otros.

282. Determinación de los calores de fusión. — Se determina el calor de fusión de un cuerpo, por el método de las mezclas.

I. El cuerpo es sólido a la temperatura ordinaria. — Fúndese una masa M del cuerpo que se somete a una temperatura T , la cual es, forzosamente, algo superior a su temperatura de fusión τ ; luego se lo sumerge en un calorímetro*, del que se mide la temperatura primitiva t_0 y la final t .

Llamemos c' al calor específico del cuerpo en estado líquido; c , a su calor específico en el estado sólido; A la capacidad calorífica del calo-

* En caso de que el cuerpo se halle a una temperatura muy superior a 100° no conviene introducirlo directamente en el agua del calorímetro; sino que se lo puede colocar en un vaso metálico que flote en la superficie del agua del calorímetro y que se sumerge cuando el cuerpo se ha enfriado lo bastante.

rimetro con el agua que contiene, y tendremos la siguiente igualdad, que nos dará el calor de fusión x del cuerpo.

$$M c'(T - \tau) + Mx + Mc(\tau - t) = A)t - t - t_0).$$

El primer término es el calor abandonado por el líquido al enfriarse de T a τ ; el segundo es la cantidad de calor perdida por el líquido al solidificarse; el tercero es la cantidad de calor que el sólido pierde al enfriarse de τ a t . Finalmente, el segundo miembro expresa la cantidad de calor que exige el calorímetro para calentarse de t_0 a t .

OBSERVACIONES. — 1º A esta ecuación se deben aplicar todas las correcciones ya indicadas (266).

2º En general, c' es una incógnita, como x . En este caso, efectúase un segundo experimento con masas diferentes de substancia y de agua; proporciona otra ecuación que, unida a la primera, permite despejar las dos incógnitas x y c' .

II. *El cuerpo es líquido a la temperatura ordinaria.* — Se solidifica a una temperatura T inferior a su punto de fusión τ : Luego introdúcelo en el agua del calorímetro que se halla a la temperatura t_0 . La temperatura final es $t < t_0$. Y tendremos, con las mismas representaciones que en el caso anterior :

$$Mc(\tau - T) + Mx + Mc'(t - \tau) = A(t_0 - t).$$

El primer término es el calor que necesita para calentarse de T a τ el cuerpo en estado sólido. El segundo, el calor que el cuerpo exige para fundirse; el tercero el calor solicitado por el cuerpo, en estado líquido, para calentarse de τ a t . Finalmente, el segundo miembro representa el calor dado por el calorímetro.

En este caso, c es generalmente la incógnita, al mismo tiempo que x . Como en el caso anterior, se efectúan dos experimentos con diferentes pesos de substancia y de agua.

CALORES DE FUSIÓN DE ALGUNOS CUERPOS

Mercurio	2,82	Plomo.	5,86
Fósforo	5,03	Estaño	14,25
Azufre	9,37	Zinc.	28,13

283. **Calor de fusión del hielo.** — El calor de fusión del hielo es el que más interesa conocer, por causa de las aplicaciones de que puede ser objeto. Se le determina también por el método de las mezclas.

Black fué quien tuvo la primera idea de efectuar esta medida.

Principio. — Tómase una masa M de hielo a cero y un calorímetro que contenga agua caliente a t_0 bastante para fundir todo el hielo. Arrójase éste en el agua y así que la fusión es completa, se mide la temperatura final θ de la mezcla. Siendo A la capacidad calorífica del calorímetro, se tiené :

$$Mx + M\theta = A(t - \theta),$$

Mx es el calor que exige el hielo para fundirse; $M\theta$ es el calor que

requiere el agua de fusión para calentarse de 0° a θ ; $A(t - \theta)$ es la cantidad de calor que cede el calorímetro.

Experimentos de La Provostaye y Desains. — La Provostaye y Desains emplearon este método, aunque con algunas correcciones suplementarias. Por ejemplo : el fragmento de hielo era enteramente puro, estaba exactamente a 0° , y además lo enjugaban muy bien con papel secante. Una vez así las cosas, se le introducía en un calorímetro cuya temperatura inicial era algo más elevada que la ambiente, de modo que la temperatura final θ fuera algo más baja, en el mismo número de grados. Así era fácil comprender por las pérdidas de calor ocurridas por conductibilidad y por radiación, al empezar la operación, los aumentos que se producían cuando, al terminarse el experimento, la temperatura del calorímetro era inferior a la temperatura ambiente. Por fin, lo que daba con exactitud la masa M del hielo fundido era el aumento de masa del calorímetro.

De esta manera hallaron el número 79,25 cal.

OBSERVACIÓN. — La experimentación ha demostrado que el hielo es el cuerpo que tiene mayor calor de fusión.

CAPÍTULO VI

VAPORIZACIÓN DE LOS LÍQUIDOS. — PRESIÓN MÁXIMA DE LOS VAPORES

284. Definiciones. — Vaporización en el vacío. — Saturación. — Presión máxima. — Se da el nombre de *vaporización* al paso del estado líquido al gaseoso.

Se llaman líquidos *volátiles* los que pueden vaporizarse fácilmente a la temperatura ordinaria (alcohol, éter). Ciertos líquidos son, por el contrario, poco volátiles (mercurio, ácido sulfúrico, glicerina, aceites) y no producen vapores a ninguna temperatura, como los aceites grasos.

Formación de vapores en el vacío. — Cuando se introduce un líquido en el vacío, se vaporiza *instantáneamente*. Si se pasa una gota de éter por el tubo barométrico A (fig. 297) (insuflándolo a través del mercurio, por medio de una pipeta curva), se ve que el líquido, al llegar a la cámara barométrica, desaparece instantáneamente y por completo, si no ha sido introducido en exceso; al mismo tiempo, el mercurio se deprime, indicando que el vapor formado ejerce una presión, que es medida por la diferencia entre el nivel primitivo y el actual.

Si se introducen más gotas de éter, se ve que, al principio, la depresión aumenta; luego, permanece constante, y el éter introducido *queda líquido, si la temperatura no varía*. Entonces, dicese que el espacio

ocupado por el vapor está *saturado* y que el vapor que lo llena es *saturante*. El carácter exterior de la saturación es la presencia de un *exceso de líquido* en contacto con la atmósfera gaseosa. Se dice también, en este caso, que el vapor ha llegado a su *presión máxima*.

La presión máxima *es independiente del volumen que adquiera el vapor*.

Demuéstrase fácilmente este hecho produciendo el vapor saturante — con *exceso líquido*



Fig. 297.

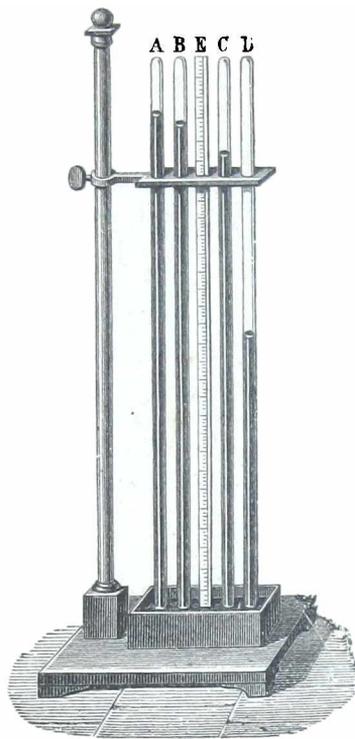


Fig. 298.

— en un tubo barométrico graduado, que se puede introducir más o menos en una cubeta profunda (fig. 297).

Obsérvase, en efecto, que si se introduce el tubo en la cubeta de modo que varíe el volumen del vapor, no varía el nivel del mercurio, mientras quede líquido no vaporizado : luego la presión permanece constante. Si se disminuye el volumen presentado al vapor, una parte de éste se condensa y se ve aumentar la cantidad de líquido. Por el contrario, este se evapora cuando se aumenta el volumen levantando el tubo, y el nivel del mercurio queda aún fijo mientras no se haya vaporizado el líquido.

Los vapores *no saturantes* se conducen como los gases. En este caso, en efecto, el nivel del mercurio baja y, por consiguiente, la fuerza elástica de vapor aumenta cuando se disminuye su volumen bajando el tubo; al contrario, el nivel del mercurio y, por consiguiente, la presión del

vapor disminuye cuando se aumenta su volumen levantando el tubo.

Tratándose de pequeñas variaciones de volumen, puede observarse que un vapor sigue la ley de Mariotte, y la sigue tanto mejor cuanto más distante se halla de su punto de licuefacción.

Variación de la presión máxima con la temperatura. — La presión máxima de un vapor *crece con la temperatura*. Para demostrarlo, basta rodear de un frasco, que contenga agua templada (fig. 300) un tubo barométrico con un exceso de éter, y se verá que aumenta la depresión del nivel de mercurio.

Presión máxima de diversos líquidos. — Los vapores de diversos líquidos, a una misma temperatura, no tienen la misma presión máxima.

Si por los tubos barométricos B, C, D (fig. 298), hacemos pasar respectivamente un exceso de agua, de alcohol y de éter, observaremos que, a 20°, la depresión del mercurio (medida por la diferencia de nivel con un barómetro seco A) es 1,7 cm. para el vapor de agua; 4,4 para el de alcohol y 43,3 para el de éter.

Todos los líquidos, menos la glicerina, el ácido sulfúrico y los aceites grasos, manifiestan una presión máxima en la cámara barométrica. En cuanto al mismo mercurio, su presión máxima, a temperaturas ordinarias, es completamente insignificante.

285. **Principio de Watt o de la pared fría.** — Imaginemos un líquido contenido en la parte A de un vaso AB (fig. 299) que no contenga más gas que el vapor del líquido; la parte A se mantiene a una temperatura T, mientras que B se halla a temperatura más baja t.

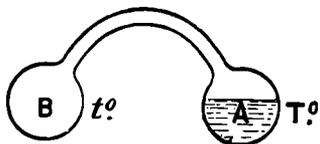


Fig. 299.

La presión en B no puede ser superior a la presión máxima f que corresponde a la temperatura t . Por otra parte, en A, el líquido tiende a emitir vapores hasta que la

presión sea la presión máxima F , correspondiente a la temperatura T. Por lo tanto, el equilibrio es imposible; el vapor producido en A se condensará en B; se dice que hay destilación de A a B.

Mientras dura el fenómeno, *la presión nunca será muy superior a la presión máxima f correspondiente a la temperatura de los puntos más fríos del vaso*. A esta proposición se ha dado el nombre de *principio de la pared fría o principio de Watt*, nombre del célebre ingeniero que fué el primero en enunciarla.

286. **Medida de la presión máxima de un vapor a diversas temperaturas.** — El método más sencillo consiste en colocar al lado del barómetro seco B, un tubo barométrico M (fig. 300) en el cual se ha introducido un exceso del líquido por estudiar. La diferencia de nivel F del mercurio en los dos tubos mide la presión máxima del vapor. Para operar a diversas temperaturas, se rodea los dos tubos de un frasco en el cual se introduce agua más o menos caliente. La temperatura de esta agua la indica un termómetro. Es preciso agitar el agua con un agitador para uniformar su temperatura.

El aparato no puede, evidentemente, servir sino para temperaturas tales que la presión máxima no supere a la presión atmosférica. Cuando se igualan ambas presiones, los niveles del mercurio en M y en la cubeta se encuentran en el mismo plano horizontal; que es lo que sucede a cada líquido en su punto de ebullición normal (291) y, en particular, al agua a 100°.

Regnault ha empleado este método, con todas las precauciones necesarias, para estudiar la presión máxima del vapor de agua. Como el frasco no puede descender hasta la cubeta, no ha podido pasar de la temperaturas de 60°. Para temperaturas más altas, ha empleado otro método (287). Para temperaturas bajas, es más cómodo, — como lo hizo, primero, Gay-Lussac, y después, Regnault, — encorvar el tubo barométrico y sumergirlo en un recinto que se enfría a la temperatura que se quiera* (fig. 301).

Según el principio de la pared fría, el líquido destila en la parte fría; la diferencia de niveles del mercurio mide, entonces, la presión máxima que corresponde a la temperatura de la región más fría.

287. **Presiones máximas del vapor de agua por cima de 60° — 1° Experimentos de Regnault.** — Regault fundó su método de medida en esta ley de ebullición : *cuando un líquido entra en ebullición, la presión máxima del vapor que se desprende es precisamente igual a la presión que soporta el líquido* (291).

El aparato se compone de una caldera de cobre C (fig. 302), herméticamente cerrada y llena de agua hasta la tercera parte poco más o menos. Cuatro termómetros atraviesan la tapadera : dos de ellos penetran en las primeras capas del líquido, y los otros dos, en las inferiores. De la caldera C arranca un tubo AB que va a adaptarse en el gollete de un matraz de vidrio M, lleno de aire. El tubo AB está rodeado del cilindro D, donde circula una corriente de agua fría. De la parte superior del matraz M parten dos tubos : uno comunica con un manómetro de aire libre O : el otro HH', que es de plomo, con una máquina neumática, o con una bomba impelente, según que se desee enrarecer o comprimir el aire del matraz. Por fin, el depósito K está lleno de agua a la temperatura ambiente.

Supongamos primeramente que se quiere medir la tensión máxima bajo 100°. Se enrarece el aire en el matraz y por consiguiente en la caldera C. Si se calienta entonces esta

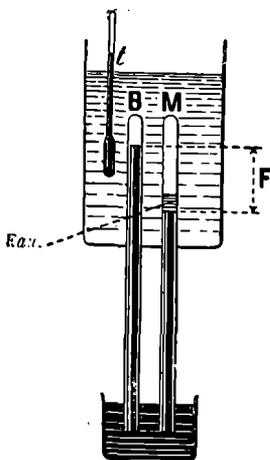


Fig. 300.

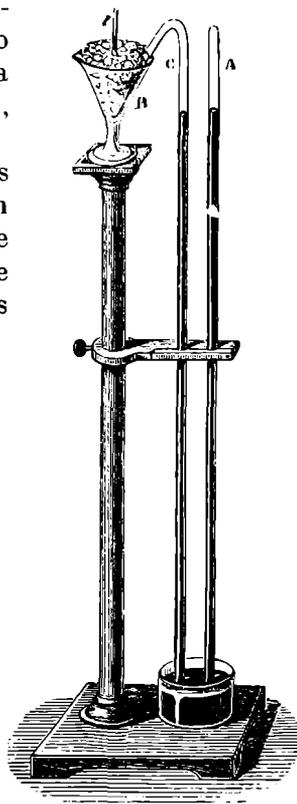


Fig. 301.

* En los experimentos de Regnault, empleábase una mezcla frigorífica líquida de hielo y cloruro de calcio.

caldera, el agua que contiene entra en ebullición y mientras dura el experimento la tensión del vapor permanece siendo igual a la presión que ejerce sobre el líquido el aire

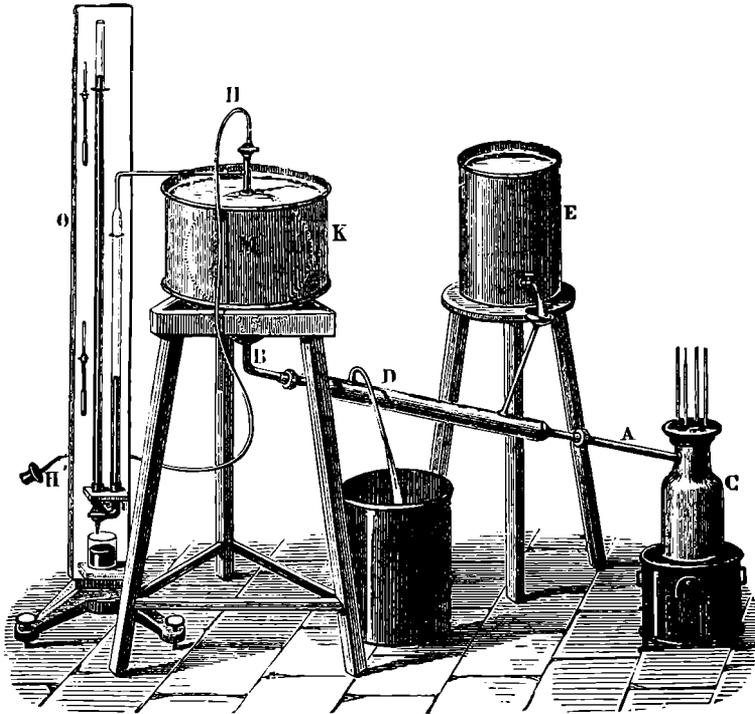


Fig. 302.

del gasómetro. Ya no falta más que leer simultáneamente el manómetro y los termómetros para determinar la tensión del vapor a una temperatura conocida.

Para medir la tensión por encima de 100°, se somete el aire del matraz y del vaso C a presiones crecientes superiores a la de la atmósfera.

Resultados. — La presión del vapor de agua crece según una ley mucho más rápida que la proporcionalidad a la temperatura. Así las presiones son :

4,6 mm. a	0°	2 atm. a	120°,6
91,98 mm. a	50°	10 atm. a	180°,3
760,0 mm. a	100°	28 atm. a	230°,9

2º Experimentos de Caillelet y Colardeau. — Estos físicos han medido, por un procedimiento especial, las presiones máximas del vapor de agua hasta 365°, temperatura a que han fijado el punto crítico (323) del vapor de agua; la presión correspondiente es de 200,5 atmósferas.

Liquidós distintos del agua. — Las presiones máximas de los líquidos distintos del agua varían según una ley análoga.

Diagramas de estas medidas. — Estos resultados pueden representarse por curvas. Así, la figura 303 representa los experimentos de Regnault con el vapor de agua. Las abscisas representan las temperaturas, y las ordenadas, las presiones máximas correspondientes.

288. **Sublimación.** — Gran número de cuerpos sólidos pueden emitir vapores sin pasar por el estado líquido intermedio. A este fenómeno se le da el nombre de *sublimación*, caso que ocurre con el hielo. Ya se había preguntado Regnault si, a una temperatura inferior a 0°, la presión máxima del vapor emitido por el hielo sería la misma que emitiría el agua sobrefundida a la misma temperatura. Había creído reconocer que estas dos presiones son iguales; pero no es exacto; la presión del vapor emitido por el hielo es, en estas condiciones, inferior a la del vapor emitido por el agua.

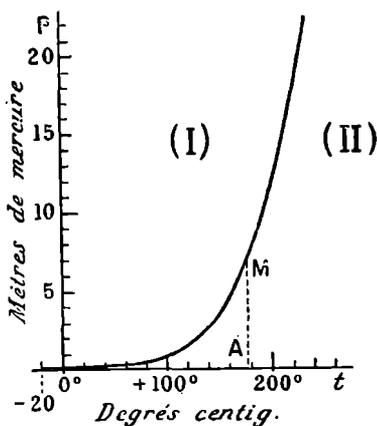


Fig. 303.

OBSERVACIONES. — El experimento siguiente, efectuado con ácido acético, demuestra que, a igualdad de temperatura, la presión máxima del vapor emitido por un sólido es más pequeña que la presión máxima emitida por un líquido sobrefundido.

Se introduce ácido acético puro y cristalizado en las dos ramas de un tubo en U invertido y cerrado (fig. 304). Se funde el cuerpo en la rama B; luego, dejándole enfriarse lentamente, se le mantiene en sobrefusión. Consérvase este tubo en un recinto a temperatura uniforme y constante y se observa que *el ácido acético destila de B a A.*

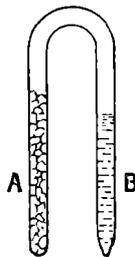


Fig. 304.

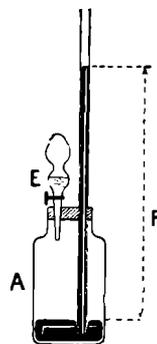


Fig. 305.

289. **Vaporización en los gases.** — Cuando un líquido se introduce en un vaso que ya contiene gas, se evapora. Si se introducen cantidades crecientes de líquido, llega un momento en que éste cesa de vaporizarse; entonces, se dice que el espacio está *saturado de vapor*. Este fenómeno puede estudiarse mediante el sencillo aparato siguiente :

Un frasco A (fig. 305) contiene aire y una capa de mercurio, en la cual se sumerge un tubo que atraviesa el tapón del frasco y se abre a la atmósfera. Al principio, la presión en el frasco es igual a la presión atmosférica; los niveles del mercurio en el tubo y en el frasco se hallan en el mismo plano horizontal.

Por medio de una pera de goma, se inyecta en el frasco una pequeña cantidad de un líquido, por ejemplo, éter, contenido en un embudo de llave. El líquido desaparece *lentamente* y el nivel del mercurio sube por el tubo. Como este es estrecho, el volumen del aire del frasco no varía sensiblemente; su presión sigue siendo la misma, y el desnivel del mercurio mide la presión del vapor en la mezcla.

Como en el caso de la mezcla de gases, *la presión total es igual a la*

suma de las presiones que tendrían respectivamente el gas y el vapor si ocupasen solos el volumen de la mezcla.

Si se añade suficiente cantidad de líquido para saturar el espacio, la presión alcanza un valor máximo. El experimento demuestra que este valor es el mismo que cuando el líquido se vaporiza en el vacío.

Lo mismo ocurre cualquiera que sea la presión inicial del gas; pero la vaporización, que, en el vacío, es instantánea, es tanto más lenta, en un gas, cuanto mayor es la presión de este último.

CAPÍTULO VII

EVAPORACIÓN. — EBULLICIÓN. — CALEFACCIÓN CALOR DE VAPORIZACIÓN

290. Evaporación. — Se da el nombre de *evaporación* a la producción de vapor en la superficie de un líquido. Por ejemplo, las telas mojadas se secan al aire, por evaporación; del mismo modo, el agua contenida en un recipiente abierto, desaparece lenta y completamente por evaporación.

Se llama *velocidad de evaporación*, en una atmósfera indefinida, la masa de líquido evaporado en un segundo.

LEYES EXPERIMENTALES. — Estas leyes se deben a Dalton :

1º La *velocidad de evaporación es proporcional a la magnitud de la superficie libre del líquido* (esto es evidente *a priori*);

2º *Es proporcional a la diferencia entre la presión máxima F del vapor líquido, a la temperatura a que se experimenta, y la presión f que, en ese momento tiene el vapor del líquido en la atmósfera.*

Por esta razón, la diferencia ($F-f$) se denomina *factor de evaporación*.

En consecuencia, la elevación de temperatura acelera la evaporación, por el crecimiento de presión máxima que comunica a los vapores. Además, la evaporación de un líquido es nula en un espacio saturado de vapores, porque, entonces, $f = F$.

3º *La velocidad de evaporación es inversamente proporcional a la presión atmosférica.*

4º *Finalmente, la corriente de aire activa la evaporación, renovando la atmósfera y retrasando la saturación.*

Casos particulares. — 1º *Ácido sulfúrico.* — Este líquido deja de emitir vapores por debajo de 30°, aun en el vacío. En efecto, si se colocan bajo el recipiente de la máquina neumática dos cápsulas que contengan, una ácido sulfúrico y la otra agua de barita, y se hace el vacío, no se forma precipitado blanco de sulfato de barita mientras la temperatura es inferior a 30°.

2º *Mercurio.* — Faraday la estudió en un experimento concluyente. Aplicando un pan de oro sobre la extremidad inferior de un tapón, y cerrando con éste un frasco lleno de mercurio, vió, al cabo de algunos días, que el oro blanqueaba amalgamándose. Merget

reconoció que los vapores mercuriales poseen un poder de difusión tal que en los locales grandes y elevados existen desde el suelo hasta el techo, a la temperatura ordinaria, aun cuando los emitan superficies de evaporación, poco extensas. Pero estos vapores tienen una presión máxima muy pequeña.

291. Ebullición. — Leyes. — Cuando se calienta un líquido, por ejemplo el agua, por su parte inferior, las primeras burbujas que aparecen no son sino aire disuelto en el agua, que se desprende. Después se elevan desde todos los puntos calentados de las paredes pequeños globulitos de vapor: pero al atravesar las capas superiores cuya temperatura es más baja, se condensan antes de alcanzar la superficie (fig. 306). De la formación y condensación sucesivas de estas primeras burbujas de vapor depende el ruido que precede a la ebullición. De ordinario se expresa este fenómeno característico de la primera fase de la ebullición diciendo que *el agua canta*.

Por fin suben gruesas burbujas a la superficie y se revientan: entonces empieza la *ebullición* propiamente dicha. Luego la ebullición es una vaporización que se produce en el *seno mismo* de la masa líquida. Este fenómeno está sometido a las leyes siguientes:

LEYES. — 1º Cuando existe una burbuja de vapor en el seno de un líquido, ésta tiene la *presión máxima* correspondiente a la temperatura del líquido, y esta presión no puede ser inferior a la presión ambiente, que apenas es superior a la presión atmosférica, si el líquido es poco profundo; de aquí la primera ley:

La ebullición no puede producirse si el líquido no tiene por lo menos la temperatura para la cual la presión máxima del vapor que emite es igual a la presión exterior.

La temperatura que corresponde a la ebullición de un líquido, bajo la presión atmosférica normal, es su *punto de ebullición*.

El punto de ebullición es uno de los caracteres físicos más importantes de la pureza de los cuerpos. En efecto, cuando un líquido es una mezcla de dos o más líquidos, desigualmente volátiles, la temperatura de ebullición no permanece fija, sino que crece constantemente, tendiendo hacia la del líquido menos volátil.

2º Desde que empieza la ebullición se mantiene estacionaria la temperatura del líquido, si permanece fija la presión exterior.

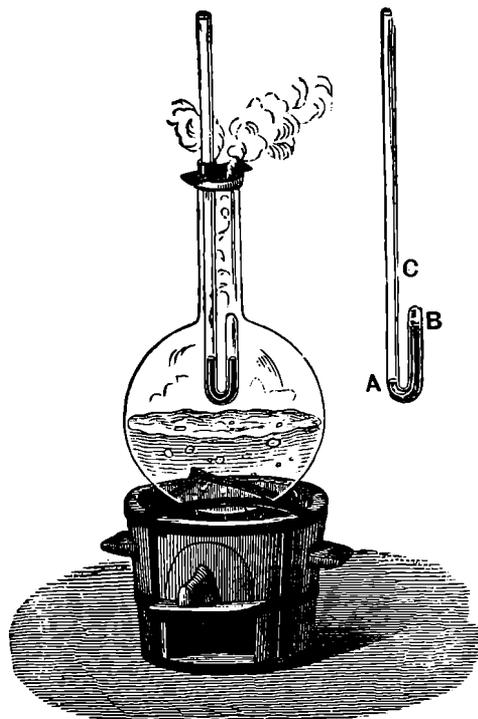


Fig. 306.

Esta temperatura aumenta y disminuye con la presión exterior : es siempre igual a aquella en que la presión máxima del vapor del líquido es igual a la presión exterior.

3º *Cuando un líquido hierve, su vapor tiene la temperatura por la cual su presión máxima es igual a la presión de la atmósfera ambiente.*

Esta ley es evidente *a priori*; porque el vapor es saturante por hallarse en presencia de un exceso de líquido. Por lo tanto, tiene su presión máxima. Por otra parte, posee también la presión de la atmósfera; puesto que el vaso comunica libremente con esta atmósfera.

La ley puede demostrarse experimentalmente por medio de un tubo encorvado AB en forma de barómetro de sifón (fig. 306). La rama pequeña cerrada está llena de mercurio; se introduce en ella una pequeña cantidad de agua; luego, se sumerge todo el aparato en un matraz a medio llenar de agua en ebullición. El agua contenida en el barómetro adopta la temperatura del vapor que la rodea, se vaporiza en parte, y se observa que el nivel de mercurio se coloca en el mismo plano horizontal en las dos ramas.

292. **Influencia de las burbujas de gas en la ebullición. — Teoría elemental de la ebullición.** — Para que la ebullición empiece a la temperatura mínima que antes hemos indicado, es preciso que las burbujas de gas, que, generalmente, se adhieren a las paredes del vaso, se hallen en contacto con el líquido.

1º *Retraso en la ebullición. Experimentos de Dufour.* — Para preservar los líquidos con que se experimenta del contacto con el aire, Dufour los colocaba en suspensión en líquidos de igual densidad, pero menos volátiles*. De este modo, halló que el agua puede llegar a 120º sin hervir. Pero, si se toca una gota del líquido así calentado, con una varilla que lleve aire consigo, la ebullición se produce bruscamente.

Experimentos de M. Gernez. — Si se prolonga la ebullición en un vaso, nótase que las burbujas de vapor disminuyen cada vez más, en número, y que sólo se forman en determinados puntos de la pared. Si se deja de calentar, cesa la ebullición, y no obstante, mediante un termómetro, puede observarse que, entonces, la temperatura del líquido es sensiblemente superior a la temperatura de ebullición normal. Pero, si se introduce una burbuja de aire, por el extremo de un tubo, en el seno del líquido, se ve que la ebullición vuelve a empezar, inmediatamente, al contacto del aire. Lo mismo ocurre si se introduce cualquier cuerpo sólido, sobre todo si éste es poroso, que lleve consigo aire, a cuyo contacto comienza de nuevo la ebullición. En este caso, dicese que la ebullición es *normal*.

El papel que las burbujas de aire desempeñan, es el siguiente : Para que se forme vapor, es menester que haya una atmósfera donde se evapore el líquido. Esta atmósfera la constituyen las burbujas de aire, invisibles casi todo el tiempo, que se adhieren a las paredes y se saturan de vapor. Cuando se ha llegado a la temperatura mínima de ebullición,

* Empleaba para el agua una mezcla de esencia de clavo y aceite de linaza.

como el vapor tiene presión suficiente, dichas burbujas aumentan de volumen y suben a la superficie del líquido.

Teoría elemental de la ebullición. — Supongamos que, contra la pared del vaso, hay una burbuja de aire saturada de vapor, de volumen v y do temperatura t . Sean H la presión total de esta burbuja, F la presión máxima del vapor a la temperatura t . La presión propia del aire en la burbuja es, pues, $H - F$. Aplicando al aire de la burbuja la ley de los gases perfectos, tenemos :

$$\frac{v(H - F)}{1 + at} = K. \quad \text{De donde :} \quad v = \frac{K(1 + at)}{H - F}.$$

Se ve que si la temperatura t llega a ser igual a la en que $F = H$, el volumen v aumenta infinitamente. Así se comprende el por qué una burbuja imperceptible de aire puede, en el momento de ebullición, engendrar gran número de grandes burbujas de vapor.

293. Influencia de la presión exterior. — Se demuestra por la experiencia que la temperatura de ebullición desciende con la presión, colocando, en aire enrarecido, una cápsula que contenga agua templada : entonces, vese que el líquido entra rápidamente en ebullición.

Experimento de Franklin. — Puede procederse de modo más sencillo. Se hierve, durante un momento, agua en un matraz de vidrio. Cuando los vapores que se desprenden arrastran todo el aire del matraz, ciérrase éste herméticamente y se le da vuelta (fig. 307). Si se enfría, entonces, la parte superior, condénsanse los vapores, se hace el vacío y originase una fuerte ebullición.

Por esta razón, en las montañas elevadas, el agua hierve a menos de 100°. En el Monte Blanco, la ebullición se produce a 84°.

El aumento de presión da lugar al efecto contrario. Así, el agua, bajo una presión de 2 atmósferas, no hierve sino a 120°,5.

Hipsometría. — El descenso del punto de ebullición del agua ocasionado por el enrarecimiento del aire, en la cima de las montañas, procura un nuevo método para medir su altura. Bastaba medir la temperatura de ebullición en la cima y buscar en las tablas construídas al efecto, la presión máxima correspondiente, de donde se deducía la presión atmosférica exterior y, por consiguiente, la altura (como se hace con el barómetro).

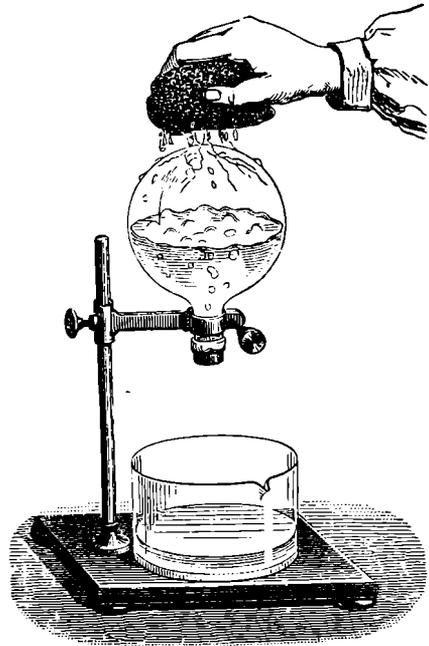


Fig. 307.

294. Líquidos calentados en vaso cerrado. — Autoclaves. — Marmita de Papin. — Cuando se calientan líquidos en vaso cerrado, como los vapores que se desprenden no encuentran ninguna salida, su presión aumenta cada vez más con la temperatura; pero la ebullición es

imposible. Por consiguiente, la temperatura del líquido puede exceder, en mucho, a su punto de ebullición normal.

Este fenómeno se aplica a los *autoclaves*. Un autoclave se halla formado por una caldera resistente C (fig. 308)

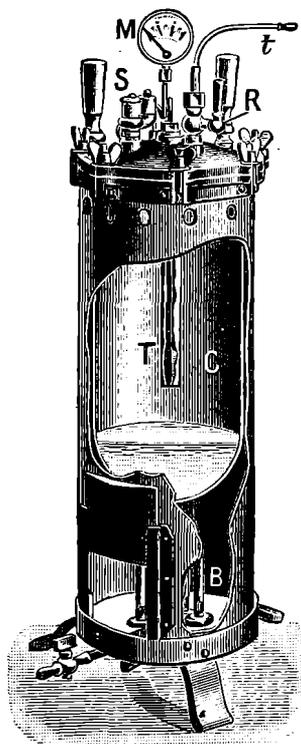


Fig. 308.

cerrada por una tapa, sujeta sólidamente por medio de un tornillo, y en la cual se calienta agua que, de este modo, se halla en vaso cerrado. Para evitar la explosión de la caldera, lleva ésta una válvula de seguridad S, que se abre cuando la presión ofrece peligro. El aparato va provisto de un manómetro M que indica, a cada instante, la presión interior, y de un termómetro T colocado en un tubo que forma cuerpo con la tapa.

Los autoclaves son perfeccionamientos de la antigua *marmita de Papin*. Se emplean para aumentar la acción disolvente del agua en ciertas operaciones de química industrial. Por este procedimiento, se transforma la oseína en gelatina, calentando los huesos en el autoclave. Úsanse también estos aparatos como *esterilizadores*, para destruir ciertos microbios a quienes no ataca la temperatura del agua hirviendo. Las *bujías* de los filtros Pasteur se esterilizan calentándolas a 120° poco más o menos.

295. **Calificación.** — Si se calienta a la temperatura del rojo, una cápsula de plata o platino, de paredes espesas; y, mediante una pipeta, se vierte en ella algunos gramos de agua, nótase que el líquido adopta la forma de un glóbulo aplanado o *esférico*. Este fenómeno se denomina *calificación*.

En este estado, vaporízase lentamente el agua; en apariencia, permanece muy tranquila, o bien animada de un movimiento rotatorio muy rápido, en el fondo de la cápsula, según su temperatura. Si la cápsula se enfría, llega un momento en que el líquido moja sus paredes y, según su temperatura, prodúcese ebullición violenta o apacible reposo de la gota.

Todos los líquidos son susceptibles de adoptar este estado; llegan a él y lo conservan tanto más fácilmente cuanto más volátiles son y cuanto más lisa es la superficie de la cápsula.

Caracteres de la calificación. — *Experimentos de Boutigny y Gossart.* — 1° *Ausencia de contacto.* — Una particularidad que tiene como consecuencia todas las demás es la falta de contacto entre el líquido y la cápsula.

Boutigny se convenció de esto, calentando al rojo una placa de plata dispuesta con horizontalidad perfecta y vertiendo encima un gramo de agua teñida de negro. Si se coloca la llama de una bujía a cierta distancia, se distingue claramente esta llama entre el esferoide y la placa; de lo cual se deduce que el líquido se mantiene a muy poca distancia de ésta.

Además, Gossart pudo sacar una fotografía instantánea de esta gota y del intervalo en cuestión.

2º *Temperatura del líquido.* — Boutigny ha observado que la temperatura de los líquidos en calefacción es *constantemente inferior* a su punto de ebullición.

Gossart ha puesto en evidencia que esta misma propiedad subsiste bajo toda presión y aun en el vacío.

3º *Temperatura de las placas.* — La calefacción es tanto más fácil de realizar cuanto más caliente es la base. Observando con un antejo el esferoide delante de una llama, se ve disminuir el intervalo luminoso a medida que la placa se enfría.

Pero en placas de plata o de oro, que son susceptibles de más perfecto pulimento, se puede mantener este estado para el agua hasta 80°. Ya entonces, no existe entre el líquido y su soporte la diferencia de temperatura que se creía característica de la calefacción.

Explicación de la calefacción. — Para explicar todos estos hechos, se puede admitir que el glóbulo líquido se encuentra sostenido a distancia del soporte por la presión del vapor que se produce continuamente en su superficie.

Por otra parte, el líquido no se calienta por contacto, sino únicamente por radiación: como es transparente para los rayos omitidos de un foco incandescente, gran parte del calor radiante lo atraviesa sin calentarlo, de modo que se evapora muy lentamente. Esta evaporación, completamente superficial, que absorbe ese débil grado de calor, mantiene al líquido en equilibrio, a temperatura algo inferior a la que produciría la ebullición.

Esta evaporación continua es la que produce entre el soporte y el líquido repulsión tanto más intensa cuanto más elevada es la temperatura de la placa.

Pero esta temperatura elevada no es necesaria, y se concibe que, dada la escasa distancia a que se ejercen las acciones moleculares, pueda una capa de vapor excesivamente delgada ser bastante a proteger los esferoides contra la atracción de la placa y su calor de conductibilidad, si en ella no hay asperezas. De ahí, su conservación sobre una placa bien pulimentada a temperatura relativamente baja; de ahí, también, la posibilidad de hacer rodar a temperatura ordinaria gotas de un líquido sobre otro líquido de análoga naturaleza, y la imposibilidad de hacerlas rodar sobre un líquido de naturaleza diferente, porque, en el primer caso, hay conservación y, en el segundo, destrucción inmediata del colchoncillo de vapor protector de las gotas.

Como estas gotas rodantes son enteramente idénticas a las de las placas incandescentes, en su forma y en la causa de su producción, se ve que la gran calefacción del soporte no es una condición necesaria de la calefacción; la emisión de vapor por el líquido no es tampoco una condición indispensable y el estado esferoidal puede realizarse en una atmósfera líquida. Si se deposita una ancha gota de mercurio sobre una placa de oro bien pulimentada, introducida en alcohol que la moja bien, esta gota permanecerá separada del oro por una delgada capa de alcohol.

Lo que caracterizá el estado llamado esferoidal parece ser una *forma capilar especial*, que se produce siempre que una pequeña masa líquida está completamente rodeada por un fluido (vapor o líquido) en el que adquiere una *tensión superficial constante* *.

296. **Calor de vaporización.** — Durante toda la duración de la ebullición normal, a presión constante, la fuente de calor que origina la ebullición desarrolla siempre calor sin que la temperatura del líquido varíe. De donde se deduce que este calor sirve para producir el fenómeno de vaporización.

Llábase *calor de vaporización de un líquido*, a una temperatura dada, el número de calorías que absorbe un gramo del líquido para transformarse en vapor saturante, a esta temperatura constante.

Determinación. — *Aparato de Berthelot.* — Se admite que un vapor al liquidarse deja en libertad una cantidad de calor igual a la que había absorbido al formarse. Este es el principio del método de determinación.

El aparato más cómodo es el de Berthelot. Es todo de vidrio, y, como tal, inatacable por la mayor parte de los líquidos. Compónese de un

* EM. GOSSART, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 26 do Octubre de 1891.

frasco F (fig. 309), que contiene el cuerpo que se estudia, calentado por un hornillo de gas G; la evacuación del vapor se efectúa por medio de un tubo T, adaptado a un serpentín S, sumergido en un calorímetro y que termina en un recipiente R puesto en comunicación con la atmósfera por el tubo t. Un termómetro θ indica, en cada momento, la temperatura del agua del calorímetro.

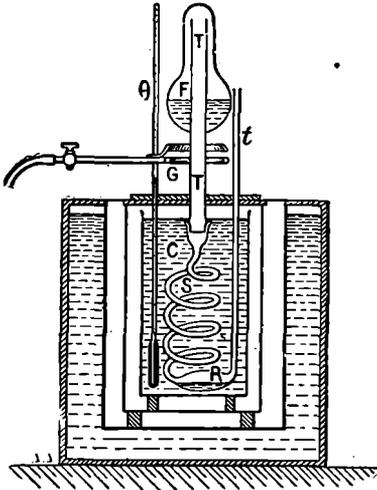


Fig. 309.

Se hierve el líquido después de tomar la temperatura inicial t_0 del calorímetro; el vapor producido a la temperatura de ebullición T se condensa en el serpentín y se reúne en R. Cuando se destila una cantidad suficiente, detiéndose la ebullición y mide la temperatura final t del calorímetro. Luego, por el aumento del volumen del serpentín y del recipiente, se determina la masa M del líquido condensado.

Cálculo del experimento. — Sean x el calor de vaporización; c el calor específico del líquido y A la capacidad calorífica del calorímetro. El calor perdido por el vapor al condensarse y al enfriarse hasta la temperatura de equilibrio t es igual al calor ganado por el agua del calorímetro, es decir que :

$$Mx + Mc(T - t) = m(t - t_0)$$

De donde :

$$x = \frac{m(t - t_0) - Mc(T - t)}{M}$$

297. Calor de vaporización del agua. — El calor de vaporización del agua fué determinado, sucesivamente, por Despretz, y Regnault, por el método que antecede; pero empleando aparatos diferentes*.

Resultados. — Regnault ha hallado, como calor de vaporización del agua a 100°, 537 calorías.

Además, demostró que el calor de vaporización λ a t° disminuye cuando t aumenta, según la fórmula empírica

$$\lambda = 606,5 - 0,695 t.$$

OBSERVACIÓN. — La comparación de los resultados obtenidos para el agua y los demás líquidos demuestra que el agua es el líquido que tiene mayor calor de vaporización. He aquí, en efecto, algunos calores de vaporización :

Éter	90	|	Acetona.	130
Benzina	93	|	Alcohol	215

* En el caso del agua, el coeficiente c de la ecuación precedente es igual a la unidad.

Calor total de vaporización. -- Se llama *calor total de vaporización* de un cuerpo a t° el número de calorías que hay que proporcionar a 1 gr. del cuerpo para que pase de su punto de fusión al estado de vapor saturante a t° ,

Para el agua, en particular, el calor total A a t° se obtiene añadiendo a λ la cantidad de calor t calorías que se necesita para elevar 1 gr. de agua de 0° a t . Luego :

$$A = 606,5 + t - 0,695 t = 606,5 + 0,305 t.$$

Se ve que el calor total de vaporización aumenta con la temperatura.

298. Frío producido por la vaporización. -- Sea cual fuere la temperatura a que se produce un vapor, siempre hay desaparición de calor.

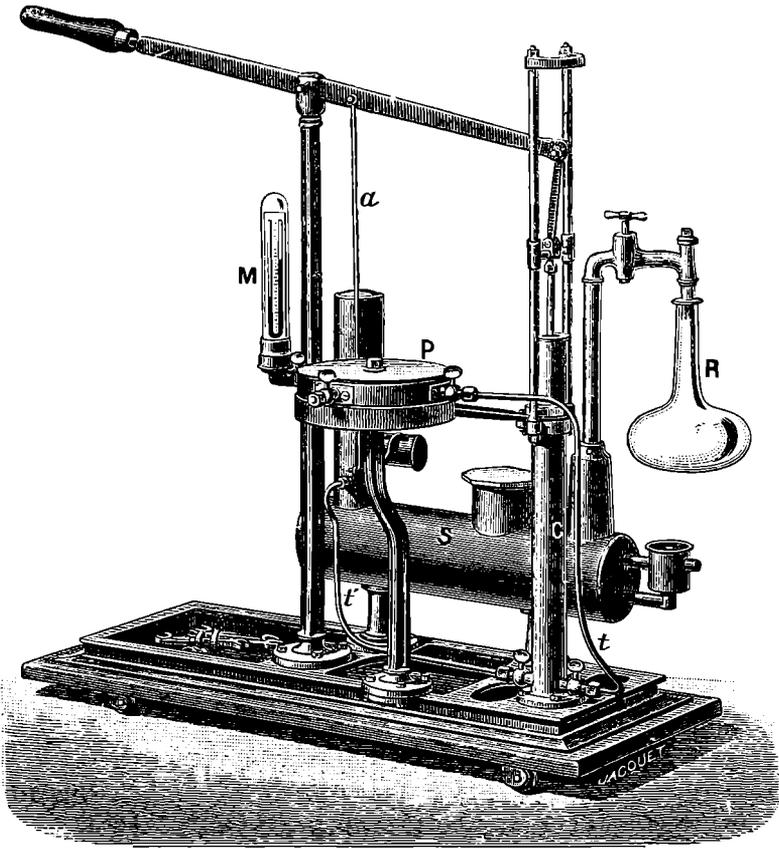


Fig. 310.

Cuando un líquido que se evapora no recibe calor exterior, su temperatura *desciende tanto más* cuanto más rápida es la evaporación.

Así, vertiendo éter en la mano, produce, al evaporarse, una viva sensación de frío; vertido en la ampolla de un termómetro rodeado de algodón en rama, disminuye considerablemente la temperatura, al evaporarse.

La evaporación del agua en el vacío puede motivar su congelación. Esto se demuestra fácilmente con el aparato de Carré (fig. 310). Por medio de la bomba C se produce el vacío en una garrafa, y se pone a bullir el agua que contiene. En el trayecto del tubo que pone en comunicación la bomba C con la garrafa, hay un depósito S que contiene

ácido sulfúrico concentrado, que absorbe sin cesar el vapor producido, de suerte que el vacío se sostiene sin necesidad de seguir dando a la bomba. A consecuencia de esta evaporación continua, la temperatura acaba por bajar hasta la congelación. Del mismo modo producen descensos de temperatura considerables haciendo evaporar, al aire y en el vacío, líquidos procedentes de gases liquidados.

CAPÍTULO VIII

DENSIDADES DE LOS VAPORES

299. **Densidades de los vapores secos.** — Se denomina *densidad de un vapor seco*, la relación que existe entre la masa de cierto volumen de este vapor, *no saturante*, y la de un volumen igual de aire, a las mismas temperatura y presión.

Si los vapores siguieran las mismas leyes de compresibilidad y dilatación que el aire, este coeficiente sería constante; pero como no sucede así, su densidad varía con la temperatura y la presión. A presión constante, la densidad decrece cuando la temperatura aumenta, y tiende hacia un límite a partir del cual permanece constante. Del mismo modo, a temperatura constante, la densidad del vapor decrece y tiende hacia un límite fijo, al disminuir la presión. Al llegar el vapor al límite de su densidad, sigue las leyes de los gases perfectos.

300. **Masa de un volumen dado de vapor.** — La masa M de un volumen de vapor se calcula por la fórmula

$$[1] \quad M = 0,001293d \frac{VH}{76(1 + at)},$$

que es la misma que para los gases y se demuestra de igual manera (260). Inversamente, si en esta fórmula se conocen las distintas magnitudes, salvo la densidad d , se utiliza para calcular esta densidad.

301. **Método de Dumas.** — El aparato adoptado por Dumas consiste simplemente en un matraz de vidrio de medio litro de cabida próximamente, cuya garganta se ha estirado en forma de punta afilada (fig. 311).

Después de secarlo por dentro y por fuera, se le pesa primero lleno de aire seco, a la presión H_1 y a la temperatura ambiente t ; después, una vez que se introduce el líquido cuya densidad de vapor se busca, se le reduce a vapores introduciendo el matraz en un baño de temperatura suficientemente elevada T . Caliéntase hasta más allá de la temperatura de ebullición de la sustancia que está en experiencia. El vapor al desprenderse oxpulta el aire contenido en el aparato. En el momento de cesar el chorro, se cierra con el soplete la punta afilada del matraz, teniendo cuidado de tomar nota inmediatamente de la temperatura del baño y de la altura H del barómetro. Por fin, cuando se ha enfriado el matraz y una vez que se le ha limpiado cuidadosamente, se le pesa de nuevo. Sea Q el exceso de la segunda pesada sobre la primera: este número representa el exceso de la masa del vapor contenido en el matraz a la temperatura T y a la presión H , sobre la masa del aire contenido allí primitivamente.

El aforo se efectúa después de la operación principal. Introdúcese la punta afilada en agua hervida y se rompe con unas pinzas la extremidad. Como el vapor se ha condensado, háse producido el vacío en el matraz, y el agua, rechazada por la presión atmosférica, lo llena completamente si se ha expulsado de él todo el aire. El volumen del matraz a la temperatura ambiente se determina posando después el agua que entró en el matraz.

Cálculo del experimento. — Por el cálculo conociendo el coeficiente de dilatación del vidrio del matraz, se deduce el volumen V , a t° , y después la masa P del aire contenido en el matraz a la temperatura t y a la presión H . La masa M del vapor contenido en el matraz a T , y bajo la presión H , es por tanto $P + Q$. Conociendo en la fórmula (1) M , H , T , se calcula el volumen V del matraz a T° . De la fórmula se deduce el valor de d .

OBSERVACIÓN. — El método suministra resultados muy

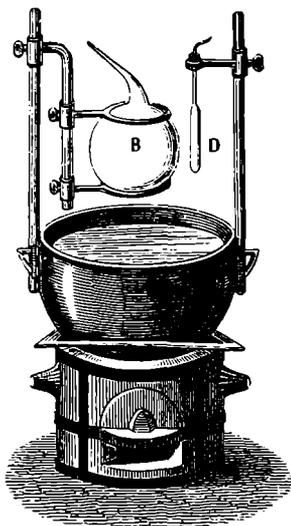


Fig. 311.

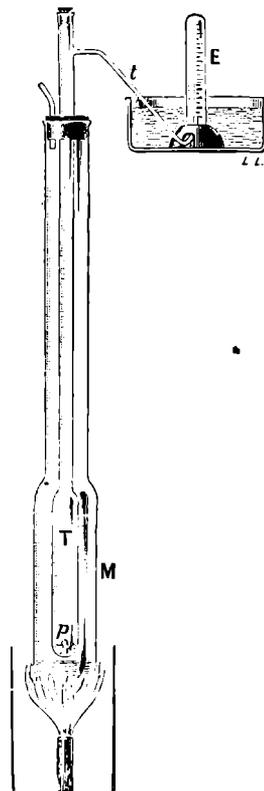


Fig. 312.

exactos, pero tiene en la práctica el inconveniente de exigir una cantidad bastante grande (25 o 30 gr.) de sustancia.

302. **Método de V. Meyer.** — El aparato se compone de un tubo T (fig. 312), cerrado por un tapón y acompañado de un tubito de desagüe que comunica con una probeta colocada en un cubo de agua y llena de este líquido. La probeta está graduada en partes de igual volumen. Se calienta el tubo T por medio de una retorta en que se nierva un líquido a propósito y luego se proyecta en él rápidamente una ampolla que contiene una masa M del líquido *. Después, ciérrase el tapón. El vapor producido arroja de T un volumen de aire igual al suyo. Este aire se desprende en la probeta. Mídense su volumen v y su temperatura t , así como también la presión atmosférica H . Estos datos permiten calcular la masa M' del aire, teniendo en cuenta que este aire está saturado de vapor de agua. Si llamamos F a la presión máxima del vapor de agua a t° la presión del aire en la probeta será $H - F$, y tendremos que

$$M' = 0,001293 \frac{V(H - F)}{76(1 + at)}$$

La densidad del vapor es igual a la relación $\frac{M}{M'}$.

303. **Densidad de los vapores saturantes.** — *Experimento de Perot.* — El método aplicado por Perot, consiste en producir una atmósfera de vapor, saturante, a temperatura

* En el fondo del tubo colócase una almohadilla de amianto, para quo aquél no se quiebre al caer el cuerpo.

conocida, en un espacio libre de aire y que contenga un matraz B (fig. 313). Entonces este matraz se llena de vapor saturante, y basta cerrar para que se pueda por medio de pesadas determinar la masa específica del vapor.

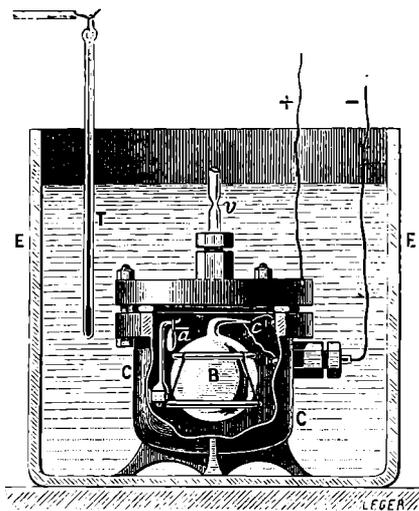


Fig. 313.

El espacio cerrado donde se produce el vapor saturante es el interior de una caldera de bronce CC, cerrada por una tapadera que mantiene varios pernos, y en la cual se puede hacer el vacío por un tubo de vidrio *v*, que pasa a través de un prensa-estopas. Dentro y sobre un soporte está un matraz B cuyo peso se conoce, lleno de aire seco, como los que se emplean en el método de Dumas. Al lado se ve una ampolla *a* llena del líquido y cerrada con la lámpara. Después de hacer el vacío *seco*, se cierra con el soplete el tubo *v*; y se coloca la caldera en un baño de maría, E, agitado constantemente. La ampolla revienta y el vapor saturado llena el matraz B: la temperatura se mantiene fija durante la última media hora y el matraz se cierra por medio de una corriente eléctrica cuyo circuito rodea el cuello. El experimento termina como en el método de Dumas.

este aumento se hace más rápido cuando la temperatura se acerca a la temperatura crítica (323, 324).

Resultados. — El experimento prueba que la masa específica δ del vapor saturado de un cuerpo aumenta con la temperatura y que la temperatura se acerca a la temperatura crítica (323, 324).

304. Masa de un volumen de aire saturado de vapor de agua. — Calculemos un volumen de aire $V \text{ cm}^3$, saturado de vapor de agua a la temperatura t y bajo la presión H .

Sea F la presión máxima del vapor de agua a t° .

Hay que observar primero que el volumen V de aire saturado es en realidad una mezcla de $V \text{ cm}^3$ de aire seco a t° , a la presión $H - F$, y de $V \text{ cm}^3$ de vapor saturado a t° y a la presión F .

Por consiguiente, por una parte, V centímetros cúbicos de aire seco pesan (en gramos).

$$[1] \quad 0,001293 \frac{V(H - F)}{76(1 + \alpha t)},$$

y por otra, siendo 0,622 la densidad del vapor de agua con relación al aire, los V centímetros cúbicos de vapor pesan

$$[2] \quad 0,001293 \times 0,622 \frac{VF}{76(1 + \alpha t)}.$$

En fin, sumando las masas [1] y [2], se tiene :

$$M = 0,001293 \frac{V(H - 0,378 F)}{76(1 + \alpha t)}.$$

305. Relación entre un volumen de líquido y el de su vapor. — Conocida ya la densidad d de un vapor, se deduce de ella el volumen que una masa conocida M de este vapor debe ocupar a una temperatura t y a una presión H dadas.

En efecto, tenemos :

$$M = 0,001293d \frac{VH}{76(1 + \alpha t)},$$

de donde

$$V = \frac{M \times 76 (1 + \alpha t)}{0,001293 \delta H}$$

Aplicando esta fórmula a 1 gramo de vapor de agua a 100° y bajo la presión normal, hallamos para V 1700 cm³ poco más o menos.

Es así que 1 gramo de agua a 100° ocupa un volumen algo mayor que 1 centímetro cúbico. luego, al transformarse en vapor a 100° y bajo la presión 76 centímetros, el agua toma un volumen unas 1700 veces mayor que en el estado líquido.

CAPÍTULO IX

LICUEFACCIÓN Y SOLIDIFICACION DE LOS VAPORES Y DE LOS GASES

306. **Licuefacción o condensación de los vapores.** — La *licuefacción o condensación de los vapores* es el paso del estado gaseoso al estado líquido.

Para que un vapor pueda liquidarse, a una temperatura dada, hay que someterlo a una presión igual a su presión máxima. Cuanto más baja sea esta temperatura menor será la presión. Y aunque la presión

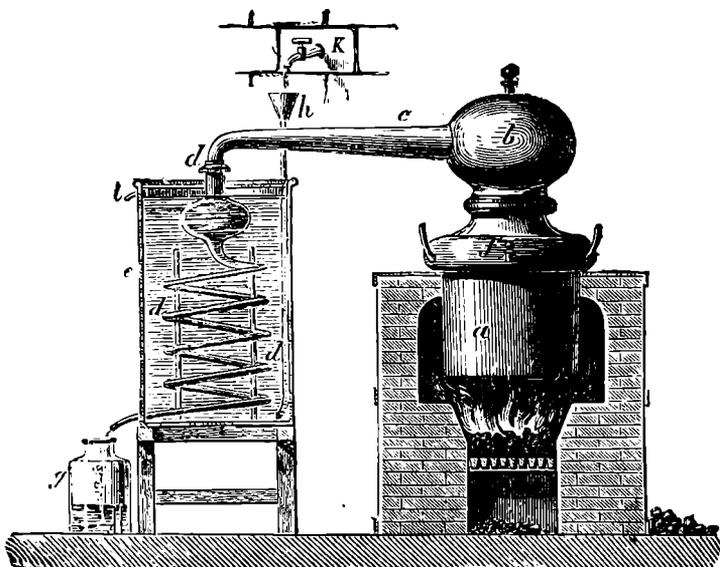


Fig. 314.

máxima sea inferior a la presión atmosférica, no hará falta comprimir el vapor para liquidarlo.

Así, se liquida, por ejemplo, el vapor de agua que procede de una caldera a (fig. 314), haciéndolo pasar por un serpentín d rodeado de agua fría. Este aparato se llama *alambique* y la operación, *destilación*;

ésta sirve para purificar el agua, separándola de las materias fijas que contiene en disolución.

La destilación sirve también para separar unos de otros los líquidos desigualmente volátiles. Por ejemplo, cuando se destila vino, el alcohol es el primero que pasa por la destilación mezclado con un poco de agua. Si se quiere aislar varios líquidos mezclados, procédese por *destilación fraccionada*, recogiendo aparte los líquidos que pasan a temperaturas cada vez más elevadas. La separación así obtenida es siempre imperfecta.

307. **Punto crítico. Vaporización total.** — La experimentación prueba que la licuefacción no es posible, para un vapor dado, sino cuando se opera más abajo de una temperatura particular llamada *temperatura crítica* o *punto crítico*, más arriba de la cual no puede existir el cuerpo en estado líquido (323).

En efecto, se puede demostrar directamente que si se calienta un líquido en vaso cerrado se llega a una temperatura en la que desaparece el líquido : es decir experimenta la *vaporización total*.

Cagniard de Latour fué el primero que probó la vaporización total del agua, del alcohol o del éter. Este fenómeno se puede observar fácilmente en el anhídrido carbónico líquido, cuyo punto crítico se acerca a 31°. Para esto se emplean tubos, llamados de *Natterer*, que son simples tubos de vidrio de paredes resistentes, cerrados por ambos extremos, habiendo introducido antes anhídrido carbónico líquido. Si calentamos suavemente uno de estos tubos, por ejemplo con la mano, se ve, que la superficie de separación se vuelve nebulosa y desaparece : parece que el tubo está lleno de un fluido homogéneo : entonces la temperatura se acerca a 31°.

308. **Licuefacción de los gases.** — Habiendo sido liquidados todos los gases, podemos considerar a cada uno de éstos como el vapor de cierto líquido. Luego las consideraciones precedentes se aplican igualmente a los gases. Para reducir un gas al estado líquido, se debe escoger una temperatura inferior a su punto crítico y comprimirle a una presión igual a la presión máxima correspondiente. Esta presión será tanto más débil cuanto más baja sea la temperatura. Estas condiciones quedan cumplidas en los diversos procedimientos que vamos a estudiar.

1° *Simple enfriamiento.* — Ciertos gases de fácil licuación pueden ser reducidos al estado líquido a la presión ordinaria por simple enfriamiento algo enérgico. En este caso se halla el anhídrido sulfuroso, que se liquida así a — 10°.

2° *Simple compresión.* — Los gases cuyo punto crítico es superior a la temperatura ordinaria pueden pasarse al estado líquido por una compresión más o menos considerable : tales son el *anhídrido carbónico*, *amoníaco*, *cloruro de metilo*, *cloro*, etc. Para liquidar uno de estos gases, se aspira, mediante una bomba, el gas contenido en un depósito y se comprime en un recipiente metálico, rodeado de agua fría, para absorber el calor de la compresión.

Actualmente, estos gases se venden a precios muy reducidos.

3° *Compresión y enfriamiento.* — *Experimentos de Cailletet.* — Con los

gases más difíciles de liquidar, Cailletet ha operado por compresión y enfriamiento en un notable aparato que se ha hecho clásico.

Descripción. — El aparato se compone de una cuba de hierro forjado BB' (fig. 315), medio llena de mercurio. En este líquido penetra una probeta TO, cuya parte superior es capilar y cerrada, la parte inferior abierta y de mayor diámetro. Esta probeta se encuentra mantenida por una tuerca n. El tubo t, conduce agua impelida por una bomba P. Un émbolo de inmersión de tornillo, gobernado por un volante X, permite

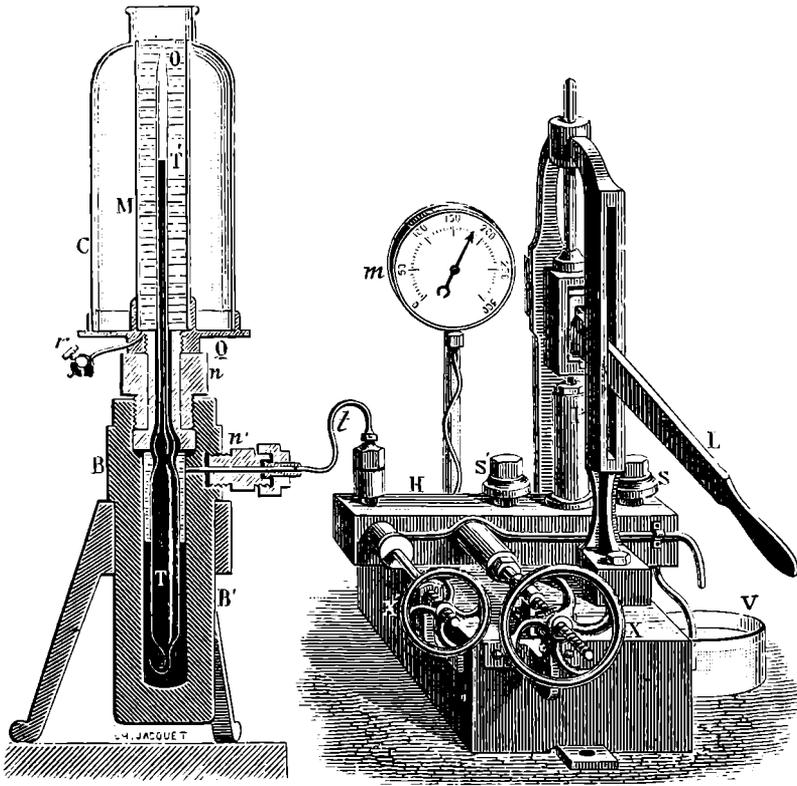


Fig. 315.

aumentar mucho la compresión. Inversamente, con la llave de tornillo gobernada por el volante X', se puede producir la expansión del gas comprimido. Por fin, un manómetro m, colocado en la caja H, marca las presiones.

Llena la probeta TO del gas que se quiere liquidar, se cubre su parte superior con una guarnición o mangote M, lleno, según el caso, de agua fría, de una mezcla frigorífica o de un gas ya liquidado. Todo esto se cubre con una campana de seguridad de cristal C, debajo de la cual se ponen las materias secantes para evitar que se deposite escarcha sobre el mangote.

Cuando se da a la bomba, el agua, aspirada del vaso V, es impelida por el tubo t, comprime el mercurio en la cuba y le hace subir hasta la

parte estrecha de la probeta. La presión puede subir hasta 500 atmósferas cuando se hace funcionar el émbolo de inmersión X. Si la temperatura es bastante baja, a cierta presión se ve gotear un depósito líquido por la pared interior de la probeta y aglomerarse en el menisco del mercurio : a partir de ese momento el manómetro marca una presión máxima del gas liquidado.

309. **Empleo de la expansión.** — La compresión de un gas aumenta su temperatura. Esto se demuestra por el clásico experimento del eslabón de aire (fig. 1) Encima del émbolo se coloca un trozo de yesca e, introduciéndolo en el cilindro, comprímese bruscamente el gas y se inflama la yesca. Inversamente, si después de dejar disiparse el calor debido a la compresión, se deja que el gas se dilate libremente, su temperatura disminuye. Si la presión disminuye así de 200 a 1 atm. la temperatura baja de unos 200°.

Para los gases que era imposible liquidar de otro modo, Cailletet recurrió a la expansión brusca, abriendo la llave gobernada por el volante X'. Por este medio se llega a una temperatura inferior al punto crítico del gas que se estudia. Entonces se ve producirse en la probeta una niebla más o menos densa, que indica una licuefacción parcial del gas.

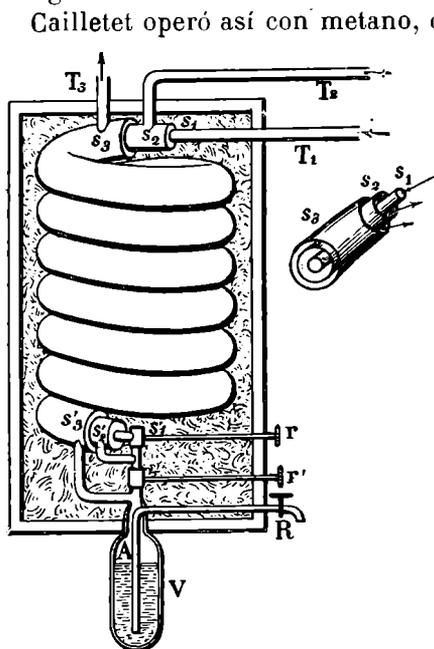


Fig. 316.

bajo una presión que, antes de la expansión, era de 300 atmósferas: pero, en las mismas condiciones, el hidrógeno sólo presentó un ligero vapor húmedo, único indicio de un principio de licuefacción.

Wroblewski y Olszewski, perfeccionando el procedimiento de Cailletet, han obtenido estos gases en forma de líquidos estables.

310. Experimentos más recientes.

— **Aparato de Linde.** — Hoy día, se ha llegado a conseguir, casi corrientemente, por decirlo así, el estado líquido de estos gases. El aparato más conocido es el de Linde para la licuefacción del aire.

Aparato. — Se funda en el principio que sigue : Un compresor de dos cilindros comprime el aire a 200 atmósferas. Para evitar la excesiva calefacción del gas por la compresión, los émbolos del compresor están cargados de agua, y el aire, al salir de cada cilindro, atraviesa un serpentín rodeado de agua fría. Este sale de un compresor cargado de gotitas de agua que deja en un recipiente denominado *separador del agua*; luego, desécase completamente y sufre un primer enfriamiento

del gas por la expansión brusca, abriendo la llave gobernada por el volante X'. Por este medio se llega a una temperatura inferior al punto crítico del gas que se estudia. Entonces se ve producirse en la probeta una niebla más o menos densa, que indica una licuefacción parcial del gas.

atravesando un tubo lleno de cloruro de calcio y rodeado de una mezcla frigorífica (hielo y cloruro de calcio). Entonces, por un tubo T_1 (fig. 316), llega a la parte superior de un serpentín $s_1 s'_1$, dispuesto verticalmente. Se dilata a 16 atmósferas, a través de una llave r y se enfría considerablemente por esta expansión*. El aire, así dilatado, desciende por otro serpentín $s'_2 s_2$ que rodea completamente al primero, y, de este modo, por su contacto, enfría al serpentín $s_1 s'_1$, y después, es conducido, por el tubo T_2 , a la segunda bomba del compresor, que lo aspira y lo lleva de nuevo, comprimido a 200 atmósferas, al serpentín $s_1 s'_1$. A causa de estas expansiones sucesivas, la temperatura del aire baja gradualmente hasta un grado próximo a la licuefacción. Para determinar aquella, basta abrir la llave r' . Parte del aire se dilata entonces, a una presión de cerca de una atmósfera y se liquida parcialmente. El líquido se reúne en un recipiente V de dobles paredes (311) mientras que el aire no liquidado por la última expansión sube a un tercer serpentín $s'_3 s_3$ que rodea a los dos primeros; de este modo enfría al serpentín $s_2 s'_2$ y se escapa a la atmósfera por el tubo T_3 . El compresor reemplaza sin cesar este aire y el liquidado, por la aspiración que en la atmósfera produce su primera bomba.

Los serpentines y las llaves de expansión están colocados en una caja llena de algodón que los aísla térmicamente.

Finalmente, de vez en cuando, se deja salir el aire líquido por un tubo A , provisto de una llave R y que se sumerge en el fondo del recipiente V .

Licuefacción del hidrógeno.

— Enfriando previamente el hidrógeno, por su paso á través de un serpentín rodeado de aire líquido hirviendo bajo presión reducida, Dewar y Travers pudieron liquidar, en cantidad considerable, este gas, en un aparato análogo al de Linde.

Experimentos de Claude. — En el aparato de Linde, el aire se dilata sin efectuar trabajo y se enfría relativamente poco, por lo cual se necesita una compresión inicial considerable. Claude tuvo la idea de utilizar la expansión del gas para producir un trabajo. Para esto se le hace llegar detrás del émbolo de un motor de aire comprimido; de este modo produce un trabajo que se utiliza para ayudar la máquina de compresión, y se enfría mucho más que

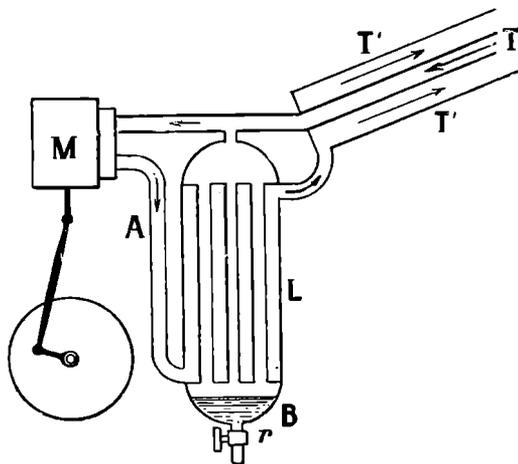


Fig. 317.

* En estas condiciones, en que el aire se dilata sin efectuar esfuerzo, se enfría próximamente un cuarto de grado por cada atmósfera que descienda la presión.

por la expansión sin trabajo exterior. Entonces es suficiente una compresión inicial de 40 atmósferas.

La figura 317 muestra la disposición esquemática de la máquina de Claude. El aire, comprimido a 40 atmósferas llega por el tubo T al motor M. El tubo T comunica con el *licuefactor* L, formado de un haz de tubos verticales contenidos en un recipiente cilíndrico. El aire que ha trabajado en M y que se ha enfriado mucho por la expansión, pasa por A al rededor de los tubos del licuefactor y lo enfría con su contacto, y va después a un tubo T' que rodea a T; así enfría el agua que llega a T; luego, el compresor le aspira de nuevo y pasa a T. De este modo el aire llega cada vez más frío a T y así sale de M; por eso el licuefactor se enfría lo bastante para que el aire líquido se reuna en la parte inferior B, de donde se le expela por la llave r. La licuefacción es mucho más fácil por el hecho de que el aire que se liquida está a 40 atmósferas.

M. Claude ha perfeccionado su máquina haciendo que la expansión se verifique en dos etapas: primero, de 40 a 20 atmósferas y, después, de 20 a 1 atmósfera: el aparato empleado se denomina *aparato compound*.

Licuefacción del helio. — El helio no se había podido liquidar antes de 1908; pues, en efecto, su punto crítico es sumamente bajo (— 267°,3 poco más o menos). Kamerlingh Onnes ha obtenido su licuefacción: el helio, comprimido a 100 atmósferas se enfriaba, primero, por su circulación en un recipiente rodeado de aire líquido, después, en otro rodeado de hidrógeno líquido. En seguida se le sometía a su expansión en otro vaso rodeado de hidrógeno hirviendo bajo presión reducida. La temperatura más baja alcanzada en este experimento fué — 270°, sea 3 grados absolutos.

311. Conservación y transporte de los gases liquidados. — Los gases fácilmente liquidables y que, a temperatura ordinaria, no tienen presión máxima muy grande, se conservan y transportan en tubos cilíndricos de acero cerrados por llaves a tuerca* (fig. 211 y 319). Pero, tratándose de gases como el aire líquido que, a la temperatura ordinaria, están muy por cima de su punto crítico y que ejercerían enorme presión en las paredes de un vaso cerrado, se conservan en vasos abiertos (fig. 318). Para evitar la producción de calor por la conductibilidad y por la condensación, en forma de hielo, del vapor de agua atmosférico, estos vasos tienen dobles paredes, en cuyo espacio intermedio se produce el vacío, por medio de un tubo que se cierra en seguida. Este dispositivo fué imaginado por M. d'Arsonval. Por otra parte, Dewar tuvo la idea de platear el vidrio, pues la capa de plata refleja el calor y le impide penetrar.

312. Solidificación de los gases. — Si se evapora rápidamente un gas liquidado, su temperatura baja, a menudo, lo bastante para solidificar el líquido que no se ha evaporado. Por ejemplo, se obtiene fácilmente nieve de anhídrido carbónico dejando escapar un chorro de anhídrido carbónico líquido a un saco de paño (fig. 319).

Sucede lo mismo con el aire. Por evaporación rápida, puede obtenerse, con 1 litro de aire líquido, medio litro de aire sólido, en forma

* Para hacer salir el líquido de estos tubos, hay que inclinarlos (fig. 319) de modo que la llave quede en la parte inferior. Si se los coloca de manera que ésta se halle arriba y se abre la llave, no se recoge más que gas.

de gelatina espesa formada de nitrógeno sólido, mezclada con oxígeno aun líquido.

313. **Aplicaciones de los gases liquidados.** — Los gases liquidados que se prestan mejor a los usos industriales son : el anhido carbónico y el sulfuroso, el amoniaco, y el clo-



Fig. 318.

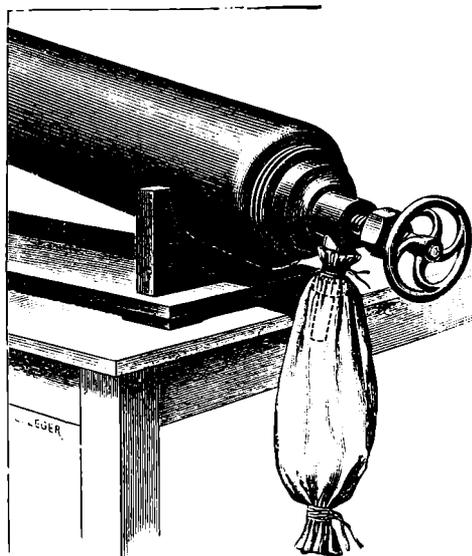


Fig. 319.

ruro de metilo. Este último, sobre todo, se emplea en los laboratorios para producir bajas temperaturas,

Entre las razones por las cuales se prefieren los gases liquidados a los comprimidos, la principal es que, bajo pequeño volumen y presión relativamente débil, se puede almacenar una masa considerable de gas. Así, 1 kilogramo de amoniaco líquido, cuyo volumen es de 1 litro poco más o menos, a temperatura ordinaria, da un volumen de gas igual a 1350 litros en las condiciones normales de temperatura y presión. Para meter en esta capacidad ese mismo volumen de aire (tomado en las condiciones normales), sería preciso comprimirle bajo la presión enorme de 1015 kilogramos por centímetro cuadrado, mientras que la presión del amoniaco liquidado no pasa de 10 kilogramos por centímetro cuadrado en las condiciones habituales de temperatura.

Máquinas frigoríficas. — Los gases liquidados son muy empleados para la producción de las bajas temperaturas que sirven para fabricar hielo y conservar materias putrescibles : carnes, conservas alimenticias, etc. Se construyen vagones de ferrocarril y navios que poseen instalaciones frigoríficas con este último objeto.

El principio de estas máquinas es el siguiente : El gas se comprime, con una bomba, en un *enfriador*, serpentín rodeado de agua fría. De ahí, pasa á un nuevo serpentín, llamado *expansor*, en donde se vaporiza rápidamente. Entonces, es aspirado por la bomba y comprimido de nuevo; de manera que el mismo gas sirve indefinidamente. En las heladoras el expansor se halla sumergido en una cuba que contiene una solución incongelable de cloruro de calcio o sal marina. En dicha cuba se sumergen recipientes prismáticos llamados *moldes*, que contienen el agua por congelar. Cuando la congelación es completa se saca el hielo del molde y se reemplaza por agua. En las cámaras frigoríficas, el método más usado consiste en colocar el expansor en el techo de la cámara.

En estas máquinas se emplean diferentes gases. La más conocida es la máquina de amoniaco. Su primitiva idea se debe a Carré; una de las más perfeccionadas es la máquina de Linde. En las máquinas de Raoul Pictet se emplea anhídrido sulfuroso, y en las de Windhausen, anhídrido carbónico.

Aplicación de la licuefacción del aire a la obtención del oxígeno y del nitrógeno. — La licuefacción del aire permite la separación en grande del oxígeno y el ázoe que constituyen el aire. Utilízase la diferencia de temperaturas de ebullición de estos dos gases

(— 194° el nitrógeno y — 108°,5 el oxígeno) para efectuar una destilación fraccionada, en aparatos muy análogos a los que sirven para extraer el alcohol del vino. Claude aplicó este principio en máquinas potentes, capaces de producir, con poco gasto, notables cantidades de oxígeno y nitrógeno. Se comprende el interés de esta fabricación. El oxígeno puro barato tendría innumerables aplicaciones en la industria química, en la metalurgia y en el alumbrado. En cuanto al nitrógeno, extraído del aire, ya ha recibido importante aplicación en la fabricación de engrases artificiales.

Extracción de los gases recién descubiertos en el aire. — Ramsay y Travers, aprovechando las diferencias de volatilidad han extraído del aire, el *criptón*, el *xenón*, el *neón* y el *helio* que existen de modo constante en la atmósfera; pero en cantidad sumamente reducida.

Producción de temperaturas muy bajas. — El anhídrido carbónico sólido se emplea muy frecuentemente en los laboratorios, para obtener temperaturas muy bajas. Como la nieve carbónica no moja los cuerpos, se obtiene contacto más perfecto empapándola de un líquido volátil: acetona, éter o, mejor aún, cloruro líquido de metilo. Este último cuerpo permite, con la nieve carbónica, obtener una temperatura de — 85° a presión ordinaria y — 125° en el vacío (según los experimentos de Villard y Jarry). El aire líquido en ebullición a presión ordinaria está a — 190°; por su evaporación en el vacío, se obtienen temperaturas extremadamente bajas. El hidrógeno hierve a — 252°,5 bajo la presión normal; evaporándose en el vacío, permite alcanzar — 258°.

Cuando los cuerpos se enfrían a estas temperaturas muy bajas, adquieren propiedades notables: la resistencia eléctrica de los metales se vuelve muy débil; los metales blandos, como el plomo, se vuelven duros y elásticos como el acero.

CAPÍTULO X

EQUILIBRIO DE UN CUERPO PURO — PUNTO CRÍTICO. CONTINUIDAD DEL ESTADO GASEOSO Y DEL ESTADO LÍQUIDO. — LEY DE LAS FASES.

314. **Definiciones.** — Ampliando lo expuesto en mecánica, diremos que un sistema de cuerpos se halla en equilibrio cuando no se produce en él ninguna transformación física ni química. En primer lugar, estudiaremos las condiciones de equilibrio de un solo cuerpo, sucesivamente bajo uno, dos o tres estados, o, como se dice ahora, bajo una, dos o tres *fases* (331), al mismo tiempo que las transformaciones por las cuales puede hacerse pasar al sistema de un estado de equilibrio o otro estado de equilibrio.

Transformaciones isotermas. — Se dice que una transformación es isoterma, cuando se efectúa a temperatura constante.

Transformaciones adiabáticas. — Dicese que un sistema sufre una transformación *adiabática* cuando, durante esta transformación, no se le proporciona ni se le quita calor. Son transformaciones con *calor constante*. Como serían, por ejemplo, las que se verificasen en recintos absolutamente impenetrables para el calor. Tales son, casi, las transformaciones que se hace sufrir, con gran rapidez, para que, mientras la transformación dura, puedan considerarse como despreciables los cambios de temperatura con el exterior. Ejemplos de transformaciones adiabáticas tenemos en el eslabón de aire y en la expansión brusca de un gas en el aparato de Cailletet (309).

Transformaciones reversibles. — Dicese que una transformación, experimentada por un cuerpo o un sistema de cuerpos es reversible, cuando por variaciones sumamente pequeñas de las variables de que depende el estado del sistema, se puede producir la transformación, ya en un sentido, ya en otro exactamente inverso.

I. 1°. Consideremos por ejemplo un gas situado en un cuerpo de bomba de paredes perfectamente conductoras del calor, cerrado por un émbolo y rodeado de un recipiente de temperatura constante *t*. Aumentemos infinitamente poco la presión ejercida sobre el gas; el volumen disminuye infinitamente poco; y una cantidad sumamente pequeña de calor que resulta de la compresión pasa al medio exterior. Si, por el contrario, se hubiera

disminuido infinitamente poco la presión, el volumen habría aumentado en esa proporción y, habiéndose enfriado el gas por la expansión, una cantidad infinitamente pequeña de calor pasaría del recipiente al gas. Por consiguiente, esta transformación, que es isoterma, puesto que se verifica a temperatura constante t , es reversible.

2º. Si, en vez de un gas, tenemos un líquido en contacto con su vapor saturado, apoyando ligeramente sobre el émbolo se produciría una ligera disminución de volumen; la presión no habría variado puesto que es la presión máxima; pero se habría condensado una porción infinitamente pequeña de vapor y la cantidad de calor infinitamente pequeña que resulta de esa condensación habría pasado al medio exterior; una elevación infinitamente pequeña del émbolo hubiera producido un efecto exactamente inverso. Luego esta transformación isoterma es reversible.

II. 1º. Consideremos el mismo gas; pero en un cuerpo de bomba impenetrable al calor, y aumentemos infinitamente poco la presión: el volumen disminuye infinitamente poco, y, al mismo tiempo, como no se disipa el calor que resulta de la compresión, la temperatura aumenta infinitamente poco. La operación contraria hubiera producido un efecto exactamente inverso. Esta transformación adiabática es reversible.

2º. Lo mismo ocurriría si, en vez de un gas, se tratara de un líquido en contacto con su vapor saturado.

Condiciones de reversibilidad. — Para que un cuerpo, o un sistema, experimente una transformación reversible, es preciso que en todos los momentos esté en equilibrio de presión y temperatura con el medio ambiente, o en un estado infinitamente próximo a este equilibrio.

Si, en efecto, se pone un cuerpo en contacto con otro de temperatura más elevada, por ejemplo, pasa calor del cuerpo más caliente al más frío, y no se podrá producir el paso inverso con una variación infinitamente pequeña de la temperatura. Lo mismo ocurre respecto de la presión.

Además, toda transformación en que ocurran frotamientos y choques, no es reversible porque estos fenómenos transforman trabajo en calor, pero no pueden efectuar la transformación inversa.

315. **Equilibrio de una masa de gas.** — *El estado de una masa de gas no depende más que de dos variables independientes.*

En efecto, si se dan la presión y la temperatura de la masa de gas, el volumen no puede tener sino un solo valor y, en consecuencia, el estado de la masa de gas queda perfectamente determinado. Del mismo modo, si se dan la temperatura y el volumen, queda determinada la presión, y, finalmente, si nos dan volumen y presión, la temperatura sólo puede tener un valor.

Como de las tres variables, presión, temperatura y volumen, no hay más que dos independientes, existe relación entre estas tres magnitudes, relación que es la *ecuación característica* del gas.

La ecuación característica de un gas perfecto es, como ya hemos dicho (257):

$$[1] \quad \frac{pv}{1 + \alpha t} = C^{\text{te}} \quad \text{o} \quad pv = RT.$$

llamando T a la temperatura absoluta.

316. **Transformaciones isotermas de un gas perfecto.** — Podemos representar gráficamente una de estas transformaciones considerando las presiones como abscisas y los volúmenes como ordenadas. En el caso de un gas perfecto, la ecuación [1] de la curva es aquella en que t tiene valor constante; es una hipérbola equilátera cuyas asíntotas son los ejes de las coordenadas: esta curva se denomina *isoterma* del gas. A las distintas temperaturas, corresponden hipérbolas equiláteras diferentes. La figura 320 representa tres isotermas diferentes de un mismo gas perfecto, en temperaturas crecientes: a esto, se llama *ramal de isotermas*.

Si el gas no es perfecto, las isotermas toman formas diferentes (318).

OBSERVACIÓN. — Muchos autores emplean distinto modo de representación. Toman como abscisas los valores de las presiones y como ordenadas los valores del producto pv .

En este caso en los gases perfectos las curvas isotermas resultan evidentemente rectas paralelas al eje de las presiones (173).

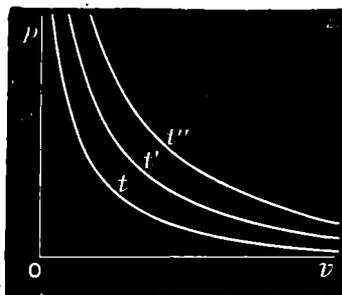


Fig. 320.

Valor de la constante de los gases perfectos. — Llamemos m a la masa de un gas de densidad d con relación al aire; p y v a su presión y volumen, respectivamente, a la temperatura absoluta T . Tendremos :

$$pv = p_0 v_0 \alpha T = RT,$$

representando p_0 una presión cualquiera y v_0 el volumen correspondiente a 0° .

Tomemos para p_0 la presión atmosférica normal $76 \times 13,596 \times 981$ dinas por cm^2 . Por otra parte, a esta misma presión y a 0° , tenemos :

$$m = v_0 d \times 0,001293, \quad \text{de donde} \quad v_0 = \frac{m}{d \times 0,001293}.$$

Luego

$$pv = \frac{76 \times 13,596 \times 981}{0,001293 \times 273} \times \frac{m}{d} T;$$

o

$$pv = 2,871 \times 10^6 \times \frac{m}{d} T.$$

Por consiguiente, la constante R es igual a $2,871 \times 10^6 \times \frac{m}{d}$. Si el gas que se considera es el aire, basta hacer a $d = 1$.

317. *Ley de Avogadro y Ampère.* — Las masas moleculares de los gases perfectos obedecen a la ley siguiente, llamada *ley o hipótesis de Avogadro y Ampère* :

Las masas moleculares de diversos gases, que se hallen en iguales condiciones de temperatura y presión, ocupan el mismo volumen.

De donde se deduce que las masas moleculares de los diversos gases son proporcionales a sus densidades.

Por otra parte, la masa molecular del hidrógeno es igual a 2,016. Luego si M es la masa molecular de un gas cuya densidad con relación al aire sea d , tendremos :

$$\frac{M}{2,016} = \frac{d}{0,0695}.$$

0,0695 es la densidad del hidrógeno con relación al aire. De donde

$$M = \frac{2,016}{0,0695} d.$$

Constante R relativa a la masa molecular. — Si tomamos masas de diversos gases perfectos, la constante R de la ley de los gases será igual en todos, en virtud de la ley de Avogadro y Ampère.

En efecto, llamando m a la masa molecular del gas, tendremos :

$$\frac{m}{d} = \frac{M}{d} = \frac{2,016}{0,0695}$$

De donde,

$$R = \frac{76 \times 13,596 \times 981 \times 2,016}{0,001293 \times 273 \times 0,0695} = 8,32 \times 10^7.$$

318. *Transformaciones isothermas de los gases reales.* — El estudio de la compresibilidad de los gases a temperatura constante ha demostrado que no siguen exactamente la ley de Mariotte. Mientras que, en el hidrógeno, el producto pv va creciendo constantemente cuando la presión aumenta, en todos los demás gases el producto pv empieza por disminuir hasta llegar a un mínimo, y luego, crece (174).

La figura 321 representa un ramal de isothermas del anhídrido carbónico deducido de los experimentos de Amagat. Si sólo se consideran las curvas relativas a las temperaturas superiores a la temperatura crítica 31° , se observará en cada curva el mínimo del producto pv . Este mínimo va acentuándose cada vez menos, según se eleve la temperatura.

Ecuación característica de los gases. — Serios trabajos fundados en la teoría cinética de los gases han conducido a M. Van der Waals a expresar la compresibilidad de un gas a una temperatura dada, por la fórmula :

$$\left(p + \frac{b}{v^2} \right) (v - a) = RT.$$

En efecto, se pueden determinar los coeficientes b , a , R de modo que esta fórmula dé la ley según la cual el volumen de una masa de gas varía en función de la presión a una temperatura dada constante.

Hay que notar que si la ley de Mariotte fuese verdadera, para una presión infinita, el volumen v sería nulo; mientras que con la ley de Van der Waals este volumen tiende hacia el valor límite a , que es lo que se llama *covolumen*. Se comprende, efectivamente que si un gas está formado de moléculas incompresibles, y si sus variaciones de volumen bajo el esfuerzo de la presión proceden del mayor o menor desvío de sus moléculas, no

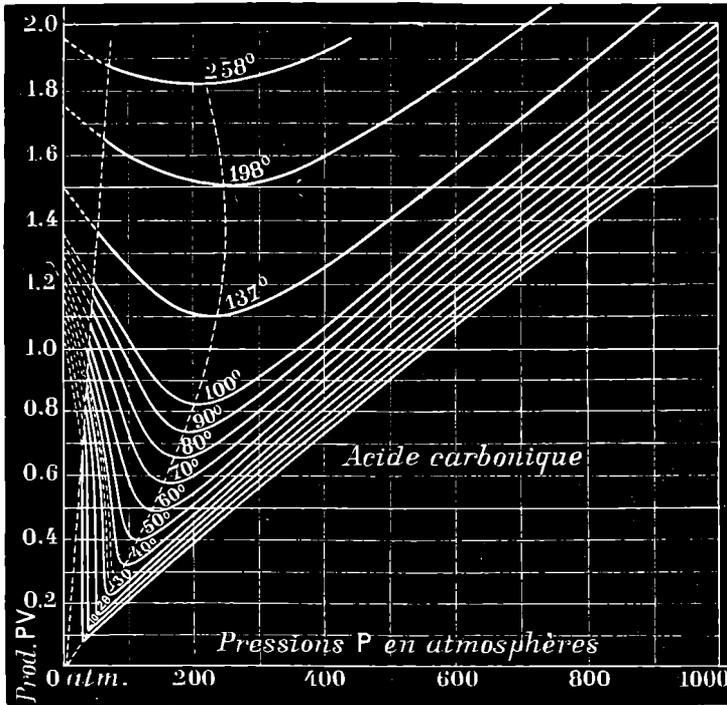


Fig. 321.

pueda ocupar un volumen nulo y tienda hacia un volumen mínimo, al que llega cuando las moléculas se cierran unas contra otras. Este volumen mínimo es el covolumen a .

Fórmula de Clausius. — La fórmula de Van der Waals no representa de manera perfecta la compresibilidad de un gas. Hay otras muchas fórmulas que la pueden representar mejor. Vamos a citar especialmente la fórmula de Clausius, que, por otra parte, difiere poco de la de Waals. He aquí la fórmula :

$$\left[p + \frac{f \cdot T_1}{(v + \beta)^2} \right] (v - a) = RT.$$

Fórmula de Sarrau. — En cuanto a la función $f(T)$, Sarrau ha propuesto reemplazarla por $K_1 - T$. La fórmula de Sarrau es :

$$\left[p + \frac{K_1 - T}{(v + \beta)^2} \right] (v - a) = RT.$$

En realidad, no se conoce la verdadera ley de compresibilidad de los gases. Las fórmulas sucesivas que hemos dado para interpretarla no son sino expresiones cada vez más aproximadas a aquélla.

319. Transformación adiabática de un gas perfecto. — En una transformación adiabática de un gas, el volumen varía en función de la presión, siguiendo una ley diferente de la de una transformación isoterma. Supongamos la expansión adiabática de un gas perfecto, partiendo del volumen y la presión representados por las coordenadas del punto M (fig. 322). A medida que el volumen aumenta, disminuye la temperatura. Por lo tanto, la curva adiabática debe cortar sucesivamente a las distintas isotermas, que corresponden a temperaturas cada vez más bajas. Tratándose de gases perfectos, las curvas adiabáticas,

lo mismo que las isotermas, son asintotas en los dos ejes de coordenadas; pero se acercan más pronto que las isotermas, al eje de los volúmenes.

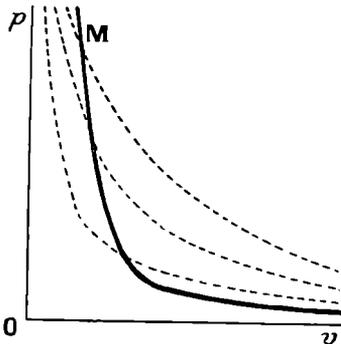


Fig. 322.

So ha demostrado que la ecuación de una adiabática es.

$$[1] \quad pv^\gamma = K$$

siendo γ la relación $\frac{C}{c}$ de los calores específicos a presión y volumen constantes y K una magnitud constante. Si el gas pasa del estado pv al $p'v'$, tendremos

$$p'v'^\gamma = pv^\gamma.$$

Además, en cualquier momento, $pv = RT$. La combinación de estas dos fórmulas permite, conociendo el estado inicial de una masa de gas, calcular su presión, su volumen o su temperatura después

de una transformación adiabática dada.

Así, de $pv = RT$, se deduce $v = \frac{RT}{p}$. Y, sustituyendo, en la ecuación [1]:

$$[2] \quad \frac{T^\gamma}{p^{\gamma-1}} = K',$$

igualdad en que K' es otra constante. Esta es la relación que existe entre la presión y la temperatura de un gas, durante una transformación adiabática, y significa que si el gas pasa del estado pT al $p'T'$, tendremos

$$\frac{T'^\gamma}{p'^{\gamma-1}} = \frac{T^\gamma}{p^{\gamma-1}}.$$

320. Equilibrio de un líquido. — Al igual que en los gases el estado de una masa líquida sólo depende de dos variables. Pero los líquidos son, en general, muy poco compresibles y la variación de volumen es casi proporcional a la variación de presión (225). De ahí, se deduce que una isoterma que represente la variación de presión en función de la variación de volumen es casi una recta, poco oblicua al eje de las presiones. Tal es la curva BL (fig. 323) que representa la compresibilidad del anhídrido carbónico líquido, deducida de los experimentos de Andrews.

321. Equilibrio de un sólido. — En general, el estado de un sólido depende de más de dos variables. El volumen, por ejemplo, depende de la temperatura y de la presión; pero, con frecuencia, según el cuerpo considerado, depende también de otras distintas variables. Así, un metal que ha pasado por el laminador no tiene el mismo volumen, en igualdad de temperatura y presión, que el mismo metal sin laminar. Del mismo modo, el volumen de un trozo de hierro o de acero depende de su imanación.

Salvo algunos casos particulares, las propiedades de los sólidos no siguen leyes tan simples como las de los líquidos y gases.

322. Equilibrio de un cuerpo puro bajo dos estados. — **Equilibrio de un líquido en presencia de su vapor.** — Imaginemos un cilindro provisto de un émbolo y que contenga un líquido, por ejemplo agua, en presencia de su vapor saturante. Si hacemos variar, a temperatura constante, el volumen del sistema, no cambia la presión, sino, únicamente, la proporción de líquido y de vapor. Pero, no obstante, las propiedades de este líquido y de este vapor continúan siendo las mismas.

Si, por el contrario, se varía la temperatura, la presión máxima cambia; y lo mismo ocurre con las propiedades de la fase vapor y de la fase líquida, con su densidad, por ejemplo.

Por esta razón, dicese que el estado de un sistema no depende más que de una sola variable, su temperatura. Y, en este caso, se dice que un líquido en presencia de su vapor saturante constituye un sistema *univariante*; mientras que un gas o un líquido solos constituyen sistemas *divariantes*.

Isotermas. — Si, a temperatura determinada, se representa la variación del volumen en función de la presión, la curva isoterma se reducirá a una recta paralela al eje de los volúmenes. Tal es la recta AB (fig. 323), perteneciente al equilibrio del anhídrido carbónico líquido en presencia del mismo cuerpo gaseoso.

para repetir los experimentos análogos a los de Andrews, y para enseñar los notables fenómenos que este sabio dió a conocer en 1869.

Sea cual fuere el aparato empleado para efectuar una serie de experimentos, se mantiene el gas a temperatura constante y, luego, se disminuye su volumen. Después, midense los volúmenes y las presiones correspondientes al gas, medidas que se repiten sucesivamente a temperaturas cada vez mayores.

Como ejemplo, vamos a describir los resultados obtenidos por Andrews para el anhídrido carbónico. Al operar a temperatura inferior a 31°, por ejemplo, a 13°, la presión empezaba por crecer a medida que disminuía el volumen (porción GA de la curva, fig. 323). Pero, a cierta presión (48.9 atmósferas), el gas comenzaba a liquidarse. Entonces, se podía continuar disminuyendo el volumen sin aumentar la presión (presión máxima) hasta que todo el gas se liquidase (punto B). A partir de este momento, si se continuaba aumentando la presión comprimiase el líquido, aunque muy poco, es decir que, un gran aumento de presión motivaba una disminución de volumen muy pequeña (porción BL de la curva). Si se operaba, luego, a temperatura más elevada, empezaba la licuefacción por una presión mayor y un volumen más pequeño (punto A'), terminando por un volumen más grande (punto B'). A medida que aumentaba la temperatura, la porción rectilínea de la isoterma disminuía. A 31°, esta porción rectilínea quedada reducida a un punto (punto de inflexión en la tangente paralela al eje de los volúmenes). Esta temperatura de 31° se denomina *temperatura crítica*. Si, pasando esta temperatura, se comprime el gas, no se ve aparecer capa líquida en ningún momento. La isoterma presenta únicamente una inflexión que va disminuyendo a medida que la temperatura aumenta, de tal modo que, a temperatura elevada, se encuentra la forma de la curva característica de los gases perfectos.

La isoterma de 31° se llama *isoterma crítica*, y la ordenada de su punto de inflexión es la *presión crítica* (72,9 atm.), su abscisa (2,15 cm³) es el *volumen crítico* cuando la masa de cuerpo sometido al experimento es igual a la unidad.

Los mismos fenómenos aparecen en todos los gases, y también en los líquidos; pero a temperaturas y presiones diferentes. He aquí algunos números :

	Temperatura crítica.	Presión crítica.
Agua	+ 365°	200 atmósferas.
Éter	+ 194.4	35.6 --
Anhídrido sulfuroso	+ 156°	79.9 --
Anhídrido carbónico	+ 31°	72.9 --
Oxígeno	- 118°	50.8 --
Nitrógeno	- 145°	33.6 --
Hidrógeno	- 241°	19.1 --

Isotermas de Amagat. — La figura 321 representa un ramal de isotermas del anhídrido carbónico que interpreta los experimentos de Amagat con este gas. Este ramal corresponde a un intervalo de temperatura mucho mayor que el de Andrews y ha sido obtenido por medio de experimentos mucho más exactos. Obsérvese que se ha tomado como ordenadas el producto *pv*. Por debajo del punto crítico, la porción de cada curva correspondiente a la licuefacción es una recta perpendicular al eje de las presiones. En efecto,

durante la licuefacción, como la presión no varía y el volumen disminuye, el producto *pv* disminuye a presión constante.

324. *Variaciones de las densidades del líquido y de su vapor saturante con la temperatura.* — Supongamos que el diagrama precedente (fig. 323) sea relativo a la unidad de masa del anhídrido carbónico. La abscisa *u'* del punto A' representa, en este caso, el *volumen específico* de este gas en estado de vapor saturante a *t°*; y la abscisa *u* del punto B representa el volumen específico del anhídrido carbónico líquido sometido a la presión de su vapor saturante. A medida que la temperatura sube, se ve que el volumen específico del vapor saturante disminuye, y, por consiguiente, aumenta su densidad. Por el contrario, el volumen específico del

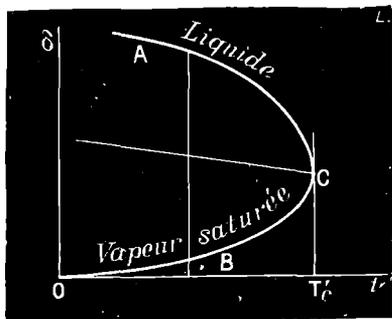


Fig. 321.

líquido aumenta y su densidad disminuye. En el punto crítico, las dos densidades se hacen iguales.

Curva de las densidades. — *Experimentos de Cailletet y Mathias.* — Supongamos que se haya determinado experimentalmente para un cuerpo la densidad del líquido y la del vapor saturado y esto hasta la temperatura crítica. Marquemos como ordenadas estas dos clases de densidades y como abscisas las temperaturas; según lo que antecede, las dos curvas A y B (fig. 324) deberán *empalmarse*, para la temperatura crítica, en un punto C donde la tangente es paralela al eje de las ordenadas. La curva ACB, considerada como curva única, es la *curva de las densidades*. Como las experiencias de Cailletet y Mathias lo han probado, tiene sensiblemente la forma de una parábola cuyo eje se incline apenas sobre el de las abscisas. En particular, el lugar geométrico de los puntos medios de las cuerdas paralelas al eje de las ordenadas es una recta. Este hecho ha sido confirmado poco hace por Amagat.

Mathias ha probado además que la densidad crítica de un cuerpo es muy sensiblemente igual al tercio de la densidad del líquido tomada a la temperatura más distante de la temperatura crítica.

La experiencia prueba que el coeficiente angular del diámetro rectilíneo es siempre negativo; de ahí se sigue que en el mismo intervalo de temperatura, la variación absoluta de la densidad del líquido es siempre mayor que la del vapor saturado.

325. *Curva de saturación.* — *Continuidad del estado gaseoso y del estado líquido.* — La curva que es lugar geométrico de los puntos AB, A'B' (fig. 323), extremos de segmentos rectilíneos de isoterma, se llama *curva de saturación*. Los puntos interiores a esta curva representan condiciones según las cuales el líquido está en equilibrio con el vapor saturante; los puntos exteriores a la curva representan, por el contrario, condiciones en que no puede existir más que un solo estado homogéneo. Los puntos de la región (I) representan condiciones en que únicamente es estable el estado gaseoso; para los puntos de la región (II) el estado estable es el líquido. Finalmente, vamos a ver que para los puntos de la región (IV), que se encuentra encima de la isoterma crítica, hay motivo para decir que el cuerpo está, ya en estado de gas, ya en estados intermedios entre el gaseoso y el líquido.

En efecto, consideremos el gas en un estado (p, v, t) representado por el punto G. Aumentemos la presión a volumen constante hasta que sea superior a la presión crítica. Para esto hay que aumentar la temperatura. El punto imaginario de esta transformación sigue una recta paralela al eje de las presiones y va a parar a E en la región (IV). En ningún momento veremos aparecer líquido, y el tubo A se llena de un fluido homogéneo. Disminuyamos la temperatura a presión constante: el volumen disminuye, y si llegamos a una temperatura inferior a la temperatura crítica, el punto imaginario de la transformación se hallará en L, en la región (II), después de haber descrito una paralela al eje de los volúmenes. Pero, en estas condiciones, el estado del cuerpo en el estado líquido, y el tubo debe estar lleno de un líquido homogéneo. Se ve que, en esta serie de transformaciones, se ha hecho pasar el cuerpo, gradualmente, del estado gaseoso al líquido, por una serie de estados homogéneos. Por tanto, ha habido *continuidad* entre los estados gaseoso y líquido. Lo mismo ocurre en toda serie de transformaciones en que el punto imaginario pase de un punto de la región (I) a otro de la región (II) *sin atravesar la curva de saturación*.

Tubos de Natterer. — *Vaporización total.* — *Experimentos de Pellat, Galitzine y Stoletow.* — En los tubos de Natterer (307) se calienta el conjunto del gas y del líquido a *volumen constante*. Pueden producirse varios fenómenos, según la proporción del líquido contenido en el tubo. Notemos, en primer lugar, que cuando se sigue una isoterma, a medida que el punto imaginario va del punto A (fig. 323) al punto B, la proporción del gas disminuye, al mismo tiempo que aumenta la proporción del líquido*.

Supongamos, pues, que se llena un tubo de Natterer a temperatura t , de modo que la proporción del líquido y del vapor corresponda al punto M, que se halla en la ordenada del punto C. Elevemos la temperatura; el nivel del líquido permanecerá poco más o menos constante, porque los puntos M, M', M'' dividen casi en la misma relación a las rectas AB, A'B', A''B''.

Pero, las densidades del líquido y del vapor son, en este caso, cada vez menos diferentes, y, cuando el conjunto llega a la temperatura crítica, las densidades se vuelven iguales. Por otra parte, los experimentos demuestran que las demás propiedades, y en particular el índice de refracción del líquido y de su vapor saturante, tienden una hacia la otra; lo cual produce la desaparición de la superficie de separación. De todos modos, esta temperatura, a la cual se produce la desaparición del menisco y que se llama tem-

*. Se puede demostrar exactamente que las masas del gas y del líquido son proporcionales a las longitudes MB y MA.

poratura de vaporización total es, en realidad, algunas décimas de grado inferior a la verdadera temperatura crítica caracterizada por la igualdad de densidades. Esto es lo que resulta de los experimentos de Pellat, Galitzine y Stoletow.

Si el tubo de Natterer hubiera contenido menos líquido, esto es, si el punto M hubiese estado más próximo a A; al calentar el tubo, el punto imaginario, que describe una recta paralela al eje de presiones, no hubiera dividido a las rectas sucesivas AB, A'B' A''B'', según la misma razón. La cantidad de gas habría aumentado a expensas del líquido, y, a una temperatura inferior a la temperatura crítica, el tubo se hallaría lleno de gas. Al contrario, si, a la temperatura t , hubiese contenido el tubo demasiado líquido, la proporción del líquido es la que hubiera aumentado con la temperatura de manera que el tubo se hallaría lleno de líquido antes de llegar a la temperatura crítica.

326. **Calor de vaporización de los gases liquidados.** — El calor de vaporización de los gases liquidados fué estudiado primero por Regnault; luego, por Favre y Silbermann, por Chappuis y, finalmente, por Mathias. El principio de los experimentos de este último es el siguiente:

El gas liquidado se halla contenido en un recipiente sumergido en un calorímetro. En él se vaporiza y atraviesa un serpentín colocado también en el calorímetro. El descenso de temperatura que pueda resultar de la fusión se compensa añadiendo ácido sulfúrico gota a gota, al agua del calorímetro, de modo que la temperatura se conserve constante. Como se conoce el calor de hidratación del ácido sulfúrico, es fácil deducir, del volumen del ácido añadido, la cantidad de calor absorbida por la vaporización del gas licuado. Este método permite operar a *temperatura constante*. Mathias procedía, para cada gas, a temperaturas variadas.

Chappuis experimentó con cloruro de metilo, anhídrido sulfuroso, anhídrido carbónico y cianógeno. Mathias, con anhídrido sulfuroso, anhídrido carbónico y protóxido de nitrógeno, y, en estos últimos gases, las medidas se aproximaron mucho a la temperatura crítica. En los límites de temperatura considerados, el calor de vaporización decrece constantemente en estos tres últimos cuerpos. Esto decrecimiento es lineal para el anhídrido sulfuroso; en el anhídrido carbónico y el protóxido de nitrógeno es sumamente rápido.

Se ve también que varios números determinados anteriormente por Regnault y Chappuis se colocan en las curvas de Mathias, y, por consiguiente, concuerdan en las mismas temperaturas.

Estas curvas demuestran que el calor de vaporización es rigurosamente nulo en el punto crítico; puesto que, en este punto, la tangente a la curva es perpendicular al eje de las abscisas.

327. **Leyes de los estados correspondientes.** — Débese a Van der Waals un conjunto de leyes notables; ese físico las enunció como consecuencia de una fórmula célebre que expuso (318) para representar las isotermas del experimento de Andrews.

Sean, p , v , t , la presión, el volumen y la temperatura centígrada de la unidad de masa de un fluido cuyas constantes críticas correspondientes son π , φ y θ . Digamos con Van der Waals

$$p = \varepsilon\pi, \quad v = n\varphi, \quad 273 + t = T = m\theta = m(273 + \theta)$$

esto es, midamos, p , v y T , tomando como unidades las constantes críticas. Admitido esto, tomemos dos cuerpos definidos por

$$\pi, \varphi, \theta \quad \text{y} \quad \pi', \varphi', \theta'.$$

Diremos que las presiones p y p' son correspondientes si se tiene

$$p = \varepsilon\pi, \quad p' = \varepsilon'\pi' \quad \text{o} \quad \frac{p}{p'} = \frac{\pi}{\pi'}.$$

Los volúmenes v , v' serán correspondientes si se tiene

$$v = n\varphi, \quad v' = n'\varphi' \quad \text{o} \quad \frac{v}{v'} = \frac{\varphi}{\varphi'}.$$

Las temperaturas $T = 273 + t$, $T' = 273 + t'$ serán correspondientes si se tiene

$$T = m\theta, \quad T' = m'\theta', \quad \text{o} \quad \frac{T}{T'} = \frac{\theta}{\theta'}.$$

La fórmula de Van der Waals prueba que si se consideran varios cuerpos en estados tales que dos de las variables p , v , T sean correspondientes, las terceras lo serán también. De aquí se deduce que:

Si se consideran varios cuerpos a temperaturas correspondientes:

1° *Sus presiones de vapor saturado son correspondientes;*

2º Sus densidades de liquido son correspondientes;

3º Sus densidades de vapor saturado son correspondientes.

La primera ley ha sido demostrada por Van der Waals con las presiones de vapor saturado de éter y de ácido sulfuroso, determinadas por Sajotchewski.

La ley relativa a la densidad de los líquidos ha sido objeto de demostraciones particularmente convincentes por parte de Mathias y de Sydney Young. Los experimentos de este último físico prueban que la teoría de los estados correspondientes es generalmente aplicable a estas densidades en toda la extensión del estado líquido, de manera que, conociendo la densidad crítica de un primer cuerpo, se puede calcular la de otro por una simple proporción, conociendo dos densidades de liquido correspondientes.

La ley relativa a la densidad de vapor saturado es la que se demuestra menos bien: solo es exacta cuando no nos apartamos demasiado de la temperatura crítica.

De la discusión de los resultados de S. Young efectuada por Mathias resulta que el teorema de los estados correspondientes no puede aplicarse a todos los cuerpos considerados en conjunto: pero si se les agrupa en series, el teorema conserva todo su valor para los diversos cuerpos de una misma serie.

Experimentos de Amagat. -- El teorema de los estados correspondientes es más general

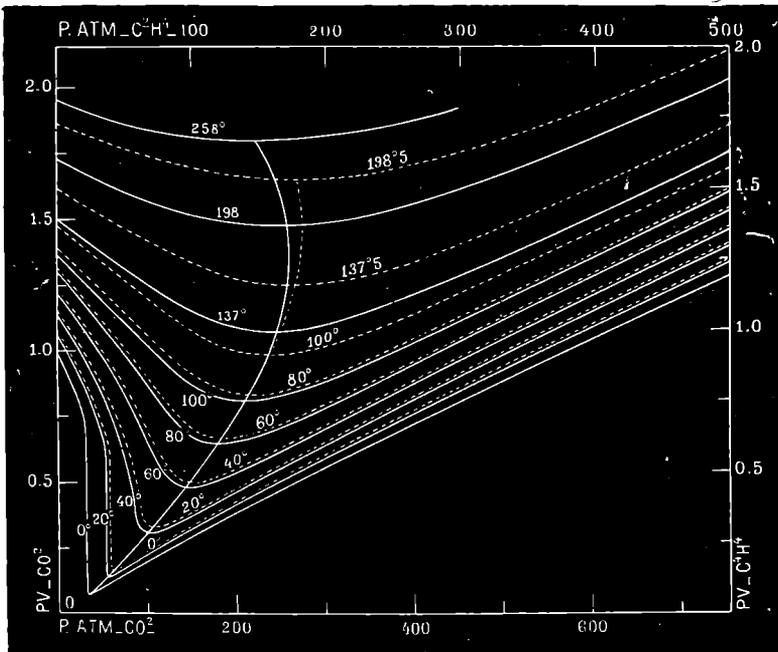


Fig. 325.

que la fórmula de Van der Waals, de la cual se dedujo primero. En efecto, ciertos cuerpos a los cuales no se aplica esta fórmula, obedecen a la ley de los estados correspondientes.

Las comprobaciones que Mathias, por una parte, y S. Young, por otra, han hecho de esta ley, se fundan en el conocimiento de los elementos críticos de los cuerpos, cantidades que siempre es difícil determinar con precisión. Esta crítica no es aplicable al método de comprobación de Amagat, el cual se funda en la observación siguiente.

Si dos cuerpos obedecen a la ley de los estados correspondientes, sus ramales de isothermas deben coincidir: su superposición deberá presentar la apariencia de un solo ramal. Como, por otra parte, un cambio de unidades corresponde a un cambio regular de la escala en uno de los ejes de coordenadas, siempre se podrán hacer semejantes los ramales de los dos cuerpos ensanchando o estrechando uno de ellos según uno de los ejes; aumentando o disminuyendo entonces uno de los ramales, se podrá obtener la superposición de los dos ramales.

Para realizar estas deformaciones, Amagat emplea un procedimiento óptico: al efecto opera con tres ramalitos fotográficos transparentes; la imagen de uno de ellos se

proyecta en el otro, a la vez que el estrechamiento de la proyección de uno de ellos, siguiendo uno de sus ejes, se obtiene por rotación al rededor del otro eje; en fin, la variación de magnitud relativa de los ramales se obtiene haciendo variar su distancia a la lente de proyección.

La figura 325 reproduce la superposición de los ramales de ácido carbónico y de etileno de Amagat (entro 1 y 500 atmósferas y de 0° a 260°): las isoterms punteadas son las de etileno: se ve que la apariencia es realmente la de un solo ramal. Amagat ha obtenido resultados satisfactorios por la triple superposición de los ramales de ácido carbónico, de aire y de éter ordinario en los límites comunes de los datos experimentales conocidos.

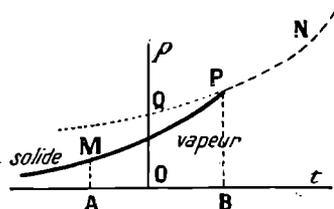


Fig. 326.

328. Equilibrio de un sólido en presencia de su vapor. — Ya hemos visto (288) que en el fenómeno de la sublimación un sólido y su vapor pueden existir en equilibrio. Por ejemplo, para el hielo conservado en vaso cerrado, existe, para cualquiera temperatura, una presión máxima de vapor. La curva MP (fig. 326) que interpreta la variación de esta presión máxima con la temperatura* es una curva de equilibrio o de reversibilidad. Si, a una presión dada AM, se considera una temperatura superior a OA el cuerpo tiene que estar completamente en estado de vapor no saturante. Al contrario, en una temperatura inferior a OA, el cuerpo debe ser enteramente sólido.

329. Equilibrio de un cuerpo sólido en presencia del líquido que resulta de su fusión. — Reversibilidad de la fusión. — Consideremos una mezcla de un sólido, el hielo por ejemplo, y del líquido que resulta de su fusión, y supongamos que esta mezcla llena completamente un recipiente en el que se puede establecer la presión que se desea y que se puede someter a todas las temperaturas.

En el caso presente supongamos que la mezcla esté a una temperatura t representada por OA (fig. 295) y a la presión $p = AM$ representada por la ordenada correspondiente de la curva de fusión. El líquido y el sólido estarán entonces en equilibrio y la fusión, en estas condiciones, será entonces reversible; porque, aumentando muy poco la temperatura o la presión, se producirá la licuefacción del agua; mientras que, por el contrario, se la solidificará disminuyendo muy poco, sea la temperatura, sea la presión. Si a la temperatura t la presión fuera superior a p , o si a la presión p la temperatura fuera superior a t , se liquidaría todo el hielo. Por el contrario, el agua debería solidificarse si a la temperatura t la presión fuera inferior a p o si, a presión p , la temperatura fuera inferior a t .

La curva representa una serie de estados en que el fenómeno es reversible, y por esta razón se le da el nombre de *curva de reversibilidad*. Esta divide el plano en dos regiones: la región (I) en que un punto representará condiciones de temperatura o de presión en que el solo estado estable es el líquido; la región (II) que corresponde como estado estable al estado sólido. Estos dos estados pueden existir simultáneamente, a lo largo de la curva. Exceptuase de esta regla la sobrefusión. A una presión dada p se puede tener agua líquida a una temperatura inferior a t ; pero ya hemos visto que el equilibrio no es estable y que el agua tiende a solidificarse. Esta solidificación es un fenómeno irreversible, porque en las condiciones en que se produce, si una disminución muy pequeña de la temperatura puede ocasionar la solidificación, una vez obtenida ésta y vuelta la temperatura a su estado primitivo, un aumento muy pequeño no puede ocasionar la fusión. Un líquido en sobrefusión está en estado de falso equilibrio, el cual desaparece tan pronto como se pone en contacto del líquido sobrefundido una partícula del sólido.

OBSERVACIONES. — 1ª Para cualquier otro cuerpo pueden desarrollarse consideraciones análogas a las que preceden. En particular, para el cloruro de carbono, la curva (fig. 296) es también una curva de reversibilidad. Por razonamientos análogos a los precedentes se ve fácilmente que ella divide el plano en dos regiones: la región (I) que representa condiciones en que el sólido solo es estable; la región (II) en que el solo estable es el estado líquido.

*. La curva se prolonga más allá de 0°, porque, a la débil presión del vapor saturante del hielo a estas temperaturas, el punto de fusión OB del hielo es superior a 0°. La curva trazada con puntos es la curva de vaporización del agua líquida. A la izquierda del punto P, representa la curva de vaporización del agua líquida en sobrefusión. Entonces, corresponde a estados de falso equilibrio.

2ª El sistema de un sólido en presencia del líquido que resulta de su fusión es *univariante* (322). En efecto, si quiere mantenerse el equilibrio sin que el sólido se transforme completamente en líquido o viceversa, la presión y la temperatura deben variar según la ley representada por la curva de fusión, y una sola de estas variables es independiente.

3ª Puede ocurrir preguntarse si es posible encontrar, para el paso del estado sólido al líquido y de éste a aquel, fenómenos análogos a los del punto crítico, y si puede haber en ellos continuidad entre los estados sólido y líquido. En primer lugar, esta continuidad existe en los cuerpos que sufren fusión pastosa. Pero como estos sólidos son amorfos, pueden considerarse como líquidos de viscosidad muy grande. El verdadero estado sólido es el cristalino*. Los trabajos de Le Chatelier y Tamman demuestran que el paso del estado cristalino al estado líquido es siempre discontinuo.

330. **Equilibrio de un cuerpo bajo tres estados.** — **Punto triple.** — Construyamos, en un mismo diagrama, la curva de vaporización del líquido, la curva de vaporización del sólido y la de fusión. La figura 327 representa este diagrama para el agua, cerca de 0°. Las dos curvas de vaporización se encuentran en un punto P, cuya ordenada representa una presión equilibrada por 0,457 cm. de mercurio. Su abscisa es el punto de fusión del agua bajo esta presión y es igual poco más o menos, a 0°,0075 (280). La curva de fusión PQ pasa evidentemente por el punto P. En efecto, en las condiciones que el punto P representa, se hallan en equilibrio, por una parte el líquido y el vapor y, por otra, el sólido y el vapor: por consiguiente, lo mismo debe ocurrir con el sólido y el líquido.

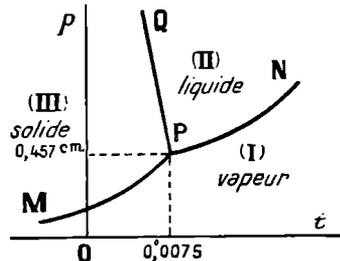


Fig. 327.

Este punto P recibe el nombre de *punto triple*. Se ve que las tres curvas dividen el plano en tres regiones: la región (I) en la cual el único estado estable es el estado de vapor no saturante (salvo en las curvas PM, PN, en que el vapor es saturante); la región (II) en la cual el sólo estado estable es el líquido y, en fin la región (III) en la cual no hay más estado estable, que el sólido.

Se ve, pues, que el sólido, el líquido y el vapor no pueden coexistir más que a una sola temperatura y a una sola presión. Por este motivo, se dice que el sistema constituido por el líquido, el sólido y el vapor en equilibrio es *invariante*.

OBSERVACIONES. — 1ª Análogas consideraciones a las que preceden pueden desarrollarse para cuerpos distintos del agua.

2ª A una presión inferior a la del punto triple, no puede existir en estado líquido un cuerpo. En consecuencia, con estas presiones no podrá fundirse un sólido; pero sí, transformarse en vapor. Este fenómeno es difícil de observar con el agua, porque la presión del punto triple es muy pequeña; pero se presenta muy claramente en el arsénico y el anhídrido arsenioso. En efecto, en estos cuerpos, la presión del punto triple es superior a la presión atmosférica. Por eso, cuando se calientan en un vaso abierto, es decir, a la presión atmosférica, no se funden; pero se transforman directamente en vapor. Mas, si se calientan en vaso cerrado, a fin de que el vapor ejerza una presión que sea superior a la presión del punto triple, pueden llegar a fundirse.

Del mismo modo, el anhídrido carbónico sólido se vaporiza sin fundirse a la presión ordinaria. Pero Villard y Jarry han demostrado que la nieve carbónica se funde a $-56^{\circ},7$ bajo la presión de 5,1 atmósferas. La temperatura de fusión sube gradualmente con la presión hasta el punto triple, que corresponde a una temperatura de $-7^{\circ},5$ y a una presión de 2500 atmósferas.

331. **Ley de las fases.** — 1º *Definiciones.* — *Fases.* — En un sistema de cuerpos en equilibrio, se llama *fase* a toda parte homogénea del sistema. Por ejemplo, cuando un sólido, el líquido que procede de su fusión y su vapor se hallan en equilibrio, existen tres fases distintas. Del mismo modo, si se llena completamente de agua un tubo, con un exceso de éter, se producen dos capas; una, de agua saturada de éter, otra, de éter saturado de agua; entonces, hay dos fases. Y si, por ejemplo, se aumenta el volumen con un émbolo móvil, se produce una tercera fase, que es una mezcla de vapor de agua y de vapor de éter.

*. Indicamos, con este motivo, la existencia de cuerpos cristalizados en estado líquido, tales como los que estudió Lehmann. Como es, por ejemplo, el paranitroxianisol que, siendo sólido a la temperatura ordinaria, se funde a 180° , transformándose en líquido birrefringente (677); luego, a 136° se transforma bruscamente en líquido isotropo (677).

Componentes independientes. — So denominan *componentes independientes* cuerpos de tal naturaleza que se los pueda añadir al sistema o suprimirlos de él sin que sea preciso cambiar el nombre del sistema. Por ejemplo, al sistema anterior se puede añadir agua o éter, sin que el sistema deje de ser un sistema de agua y éter: el agua y el éter son componentes independientes.

Varianza de un sistema. — So llama *varianza* de un sistema el número de sus grados de libertad, es decir, el número de magnitudes que pueden variar de modo independiente sin que se necesite cambiar el nombre del sistema.

Así, el sistema de un líquido en presencia de su vapor sólo tiene un grado de libertad, es un sistema univariante; mientras que el sistema formado por un gas solo, en un recinto, tiene dos grados de libertad.

Ley de las fases. — *La varianza de un sistema en equilibrio es igual al número de componentes independientes, aumentado en dos unidades y disminuido en tantas unidades como fases tenga el sistema.*

Si representamos por v la varianza del sistema; por c el número de componentes independientes, y por φ el número de fases. tendremos:

$$v = c + 2 - \varphi.$$

Esta ley fué enunciada por Gibbs. De ella se han dado varias demostraciones, de entre las cuales citaremos la del propio Gibbs, la de Le Chatelier* y la de Perrin**.

No desarrollaremos estas demostraciones; únicamente vamos a hacer notar que la ley de las fases concuerda con los resultados del estudio que del equilibrio de un cuerpo puro acabamos de hacer.

1º *Caso de un gas.* — Hay un sólo componente independiente ($c = 1$), una sola fase ($\varphi = 1$). La varianza es igual a $1 + 2 - 1 = 2$. Sabemos que, en efecto, este sistema es divariante.

2º *Líquido o sólido en presencia de su vapor, sólido en presencia del líquido resultante de su fusión.* — No hay más que un componente independiente ($c = 1$) y dos fases ($\varphi = 2$). Luego,

$$v = 1 + 2 - 2 = 1$$

Por consiguiente, el sistema es univariante.

3º *Líquido, sólido y vapor en equilibrio.* — Continúa siendo $c = 1$; pero $\varphi = 3$.

Luego

$$v = 1 + 2 - 3 = 0.$$

El sistema es invariante.

CAPÍTULO XI

DISOLUCIÓN. — PROPIEDADES DE LAS SOLUCIONES

332. Disolución. — Coeficiente de solubilidad. — Curvas de solubilidad. — Un cuerpo se disuelve cuando se liquida en un líquido. Así, el azúcar y la mayoría de las sales se disuelven en el agua. Del mismo modo, el azufre y el fósforo disuélvense en el sulfuro de carbono. En este caso, el líquido se denomina *disolvente*; el conjunto del disolvente y del sólido disuelto llámase *solución*.

Concentración de una solución. — La concentración de una solución se define y mide por la masa del sólido disuelto en 1 gr. del disolvente.

Coeficiente de solubilidad. — A una temperatura dada, hay una masa

*. *Revue générale des sciences*, 30 octubre 1899.

** J. PERRIN, *Les Principes*.

máxima, a partir de la cual el sólido deja de disolverse. La concentración tiene, pues un *máximum*, en cada temperatura. Esta concentración máxima recibe el nombre de *coeficiente de solubilidad* del sólido; es decir, *la masa máxima del sólido que puede disolverse en 1 gr. del disolvente* *.

Cuando el disolvente ha disuelto de este modo la cantidad máxima de sólido, dicese que la solución está *saturada*.

Para determinar el coeficiente de solubilidad, se mantiene a la temperatura deseada el líquido con un exceso del cuerpo sólido. Al cabo de algunas horas la solución queda saturada; se extrae de ella una masa *m* y se la evapora. Se deposita el sólido y se pesa; sea *m'* su masa. Esta masa *m'* se ha disuelto en una masa *m - m'* de disolvente : luego

$\frac{m}{m - m'}$, es el coeficiente de solubilidad.

El coeficiente de solubilidad depende a la vez de la naturaleza del cuerpo disuelto y de la del disolvente. Generalmente, varía con la temperatura, y en la mayor parte de los casos, aumenta con ella : así, el nitrato de potasio, el hiposulfito de sodio, etc., son mucho más solubles en caliente que en frío. En otros cuerpos (cloruros de potasio y sodio) apenas se nota el aumento de solubilidad con la temperatura. En fin, en ciertas sales, la variación es discontinua. Así, en el sulfato de zinc, la solubilidad crece de 0° a 81°; luego, decrece más abajo de 81°. Explícanse estas particularidades por la formación de ciertos compuestos con agua, que se llaman *hidratos*.

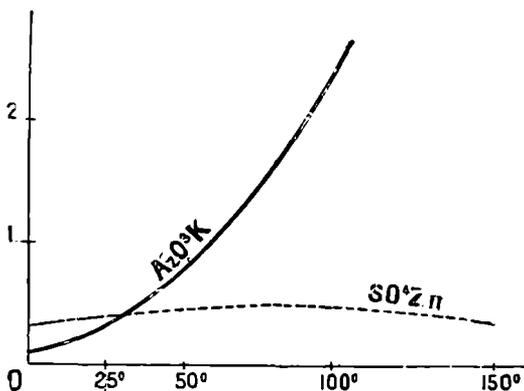


Fig. 328.

Curvas de solubilidad. — Supongamos un diagrama en que las abscisas representan temperaturas y las ordenadas concentraciones de soluciones. Se llama *curva de solubilidad* de un cuerpo la curva obtenida tomando como ordenada, en cada temperatura, el valor del coeficiente de solubilidad. La figura 328 presenta las curvas de solubilidad del nitrato de potasio y del sulfato anhidro de zinc.

La curva de solubilidad es una curva de equilibrio del sólido en presencia del líquido. Los puntos que se hallan a la derecha de la curva representan las condiciones de concentración y de temperatura para las cuales no se satura la solución.

Fenómenos térmicos que acompañan a la disolución. — Durante la diso-

*. A menudo, tómate también como coeficiente de solubilidad, la masa máxima del sólido que puede disolverse en 100 gr. del disolvente.

lución, hay, lo mismo que durante la fusión de un sólido, absorción de calor; de modo que si no se proporciona calor por medio de una fuente exterior, se produce un descenso de temperatura durante la disolución. Por esta razón, si se disuelve nitrato de amoníaco en agua, puede bajar la temperatura hasta -10° .

Pero, no obstante, en algunas disoluciones, la temperatura se eleva en vez de bajar; debido a que, en estos casos, la disolución va acompañada de la combinación del cuerpo disuelto con el líquido, combinación que se efectúa con desprendimiento de calor.

333. Cristalización. — Sobresaturación. — Cuando se disuelve un sólido en un líquido, se separa de él lentamente; generalmente adopta forma cristalina (278). Este modo de cristalizar se denomina *cristalización por vía húmeda*, por oposición a la *cristalización por vía seca* que se produce fundiendo el cuerpo y dejándole solidificarse. Un cuerpo puede cristalizar por vía húmeda de dos modos diferentes :

1^o Se abandona a la evaporación en un vaso de ancha boca (*cristalizador*) una solución del cuerpo. Evapórase el disolvente y cristaliza el sólido. Cuando la evaporación se produce lentamente, con frecuencia se formán cristales magníficos. De este modo se ha podido obtener buenos cristales octaedros de alumbre.

2^o Cuando el cuerpo es más soluble en caliente que en frío, se hace con él una solución saturada en caliente y se la deja enfriar lentamente : así, el cuerpo cristaliza. De este modo se obtienen hermosas agujas cristalinas de nitrato de potasio.

Sobresaturación. — Si se enfria una solución saturada de un cuerpo más soluble en caliente que en frío, ocurre, a menudo, que no se produce cristalización. Es un fenómeno completamente análogo a la sobrefusión y que se denomina *sobresaturación*. Prodúcese muy fácilmente con sulfato, hiposulfito y acetato de sodio que, disueltos en agua caliente y fríos, no cristalizan por sí solos.

La sobresaturación cesa en cuanto se introduce en el líquido una partícula sólida ya sea del cuerpo en disolución, ya de un cuerpo isomorfo. Por este motivo, para conservar una solución sobresaturada hay que ponerla al abrigo del polvo atmosférico, que pueden contener estos cuerpos, e impedir que se produzca la sobresaturación.

En el diagrama de la figura 328, los puntos que se hallan a izquierda de la curva representan las soluciones sobresaturadas.

Desprendimiento de calor durante la cristalización. — En el momento en que cristaliza el cuerpo disuelto, restituye el calor que absorbió al disolverse. En caso de cristalización lenta el desprendimiento de calor no es sensible; pero, cuando cristaliza una solución sobresaturada, como el fenómeno es rápido, va acompañado de una elevación de temperatura que, frecuentemente, es notable.

334. Fenómenos que se producen cuando baja la temperatura de una solución no saturada. — Supongamos una solución concentrada, pero sin saturar, de un cuerpo cuya solubilidad aumente con la temperatura, por ejemplo, el cloruro de sodio. En el diagrama (fig. 329) en que

las temperaturas están representadas como abscisas y las concentraciones como ordenadas, esta solución está representada por el punto M_1 . Enfriémosla. Para una temperatura determinada Op_1 , la solución está saturada, y si evitamos la sobresaturación, parte de la sal común cristaliza si se disminuye aún más la temperatura. Entonces, disminuye la concentración y el punto imaginario de la transformación sigue la curva de solubilidad. La experimentación demuestra que a cierta temperatura e (que para la sal marina es -22° , siendo 0,29 la concentración), toda la solución se convierte en

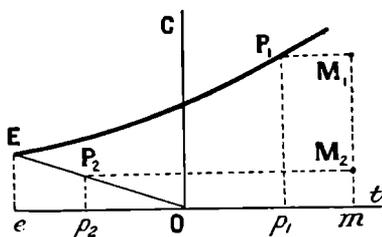


Fig. 329.

masa, pues la misma agua se solidifica también. Los cristales de sal y de hielo no forman mezcla íntima; sino que se yuxtaponen unos sobre otros. Esta mezcla se denomina mezcla *eutéctica* y la temperatura a que se produce llámase *punto de eutexia*.

Partamos ahora de una solución muy extendida M_2 . Si la enfriamos lentamente *el disolvente es el primero que cristaliza*, a una temperatura inferior a su punto de solidificación, cuando es puro (336). También podría suceder que el líquido permaneciese en fusión. Este fenómeno puede evitarse proyectando de cuando en cuando, en el líquido, pequeñas partículas del disolvente solidificado. Si, después, se continúa el enfriamiento, el disolvente se solidifica cada vez más y, en consecuencia, la concentración aumenta. Los experimentos demuestran que finalmente se llega al mismo punto de eutexia, en que el conjunto se convierte en masa.

335. Mezclas frigoríficas. — Cuando se disuelve un sólido en agua, la temperatura a que ésta se congela siempre es inferior a cero. Así, una solución de sal marina se congela a temperatura tanto más baja cuanto más concentrada es la solución, sin que, en ningún caso, la temperatura de solidificación pueda descender de -22° , temperatura a la cual se solidifica enteramente toda solución de sal común. De ahí se deduce que si se mezcla sal con hielo, éste se funde disolviendo la sal. Esta fusión del hielo absorbe un calor considerable al cual se añade la absorción de calor debida a la disolución de la sal : de donde resulta un fuerte descenso de temperatura.

Del mismo modo, 4 partes en peso de cloruro de calcio, con 3 partes de nieve o de hielo machacado pueden bajar la temperatura de $+10^\circ$ a -50° .

Estas mezclas llevan el nombre de *mezclas frigoríficas*. Antes, constituían el único medio de enfriar los cuerpos. Su importancia ha disminuído mucho desde que se sabe producir fácilmente gases liquidados, con los cuales se obtiene, con mayor comodidad, temperaturas mucho más bajas (313).

336. Descenso del punto de congelación de un disolvente por la presencia del cuerpo disuelto. — **Crioscopia.** — Cuando un disolvente

tiene un cuerpo en disolución, si la solución es diluida y se la enfria lentamente evitando la sobrefusión, ésta empieza por desprender cristales del disolvente, pero a una temperatura siempre más baja que la de solidificación del disolvente puro. El estudio de este fenómeno se denomina *crioscopia*.

Por regla general, para cada disolución y concentración hay una temperatura T tal que el hielo (o más generalmente el disolvente sólido) estando en contacto con la disolución, se liquida cuando la temperatura es superior a T , se forma si la temperatura es inferior a T . Esta temperatura T se llama *temperatura máxima de congelación*. También se le llama *punto de congelación* de la solución.

La diferencia entre el punto de congelación del disolvente puro y el de la solución se llama *descenso del punto de congelación*.

Determinación de los puntos de congelación. — Dos son los métodos empleados :

1º Se utiliza la propiedad que tienen las disoluciones de permanecer en sobrefusión. Después de haber expuesto la disolución a una temperatura inferior al punto de congelación, se introduce una partícula del disolvente solidificado. La solución se congela en parte y la temperatura sube hasta un valor que es el punto de congelación de la parte que quedó líquida.

2º *Método de Ponsot.* — En un recipiente frío se ponen la disolución y el disolvente sólido y se mantiene la temperatura constante; se establece un equilibrio, la temperatura de equilibrio es la temperatura de congelación de la disolución.

Aparato. — En estos experimentos hace falta enfriar muy lentamente el líquido. Para esto, puede emplearse el sencillo aparato siguiente :

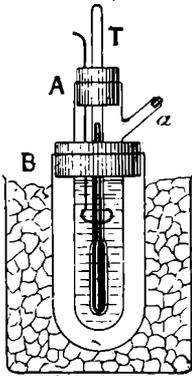


Fig. 330.

Se introduce el disolvente en un tubo A (fig. 330), cerrado por un tapón al que atraviesan el termómetro T y la varilla de un agitador. El tubo A se halla dispuesto dentro de otro tubo B sumergido, a su vez, en una mezcla frigorífica.

El enfriamiento del vaso A efectúase lentamente, por radiación a través de la capa de aire interpuesta entre los dos tubos. Cuando se determina el punto de congelación del disolvente puro, se añade, por el tubito a, el cuerpo por disolver; luego, una vez efectuada la disolución, mídese la temperatura de congelación de la solución. De este modo, pueden demostrarse las siguientes leyes :

LEYES DE LA CRIOSCOPIA. — 1ª *Ley de Blagden.* — *El descenso del punto de congelación de una disolución es proporcional a la concentración de esta solución mientras permanece diluida.*

2ª *Ley de Raoult.* — *El descenso del punto de congelación de una solución es, para una concentración dada, inversamente proporcional a la masa molecular del cuerpo disuelto.*

Expresión de las leyes de la crioscopia. — Supongamos una solución

que, en P gramos de disolvente, contenga p gramos de un cuerpo disuelto cuya masa molecular es M ; la concentración es $\frac{p}{P}$. En virtud de las leyes precedentes, el descenso θ de la temperatura de congelación es pues :

$$[1] \quad \theta = K \cdot \frac{p}{P} \times \frac{1}{M},$$

siendo K constante para el mismo disolvente; pero que cambia con el disolvente considerado. Para el agua $K = 1860$; para la bencina, $K = 4900$ y para el ácido acético $K = 3900$.

Descenso molecular. — Si en una masa dada del disolvente se disuelve una molécula gramo de diversos cuerpos, el descenso del punto de congelación es el mismo.

Para demostrarlo, basta hacer $p = M$ en la fórmula [1]; se tiene $\theta = \frac{K}{P}$, que no depende del cuerpo disuelto. Si, particularmente, $P = 1000$ gr. el descenso correspondiente se llama descenso molecular correspondiente al disolvente.

Luego ese es el descenso del punto de congelación obtenido cuando se disuelve una molécula-gramo de un cuerpo en 1000 gramos de disolvente; es igual a $\frac{K}{1000}$ *.

El descenso molecular es $1^{\circ},86$ para el agua, $3^{\circ},9$ para el ácido acético y $4^{\circ},9$ para la bencina.

Anomalías del fenómeno. — Las leyes precedentes no se aplican a las sustancias electrolíticas (728) (ácidos, bases, sales) disueltas en agua. De modo que, si se disuelve una molécula gramo de cloruro de sodio ($\text{NaCl} = 58,5$) en un kg. de agua, el descenso del punto de congelación es $3^{\circ},1$ en lugar de $1^{\circ},86$. En general, el descenso molecular producido por un electrólito es siempre más grande que el producido por un no electrólito.

Esta anomalía se explica por la hipótesis de la *disociación en iones* (735). Se admite que, cuando se disuelve cloruro de sodio, la molécula NaCl se divide en dos partes, o iones, Na y Cl , y, esto incompletamente, y tanto más cuanto más extendida es la solución. Desde el punto de vista crioscópico, cada ion obra como una molécula entera; de manera que, para el cloruro de sodio, el descenso molecular sería $2 \times 1^{\circ},86$, si la sal quedase enteramente desasociada. Lo mismo ocurriría con cualquier otro electrólito formado por dos iones monovalentes tales como $(\text{H})(\text{Cl})$, $(\text{AzO}^{\circ})(\text{Na})$. En un cuerpo compuesto de un ion divalente y dos iones monovalentes (tal como BaCl^2), el descenso molecular sería $3 \times 1^{\circ},86$ si la disociación fuese completa.

Esta hipótesis explica no sólo las anomalías de la crioscopia, sino también las de la ebulloscopia (338), de la presión osmótica (339), así como los fenómenos que ofrece el paso de la corriente eléctrica a través de los electrólitos (735).

Aplicación de la crioscopia a la determinación de las masas moleculares. — Las leyes de la crioscopia se utilizan frecuentemente en química para fijar la masa molecular de un cuerpo.

Para esto, se determina el descenso θ de la temperatura de congelación de una solución del cuerpo en un disolvente adecuado y la concentración $\frac{p}{P}$ de esta solución. De la fórmula precedente, en la que también se conoce la constante relativa al disolvente escogido, se deduce la masa molecular M del cuerpo. Este método no puede aplicarse a un electrólito disolviéndolo en el agua.

* A veces se suele tomar, como descenso molecular, el descenso producido por una molécula-gramo disuelta en 100 gr. del disolvente; entonces es igual a $\frac{K}{100}$.

337. Influencia de una sustancia disuelta bajo la presión máxima del vapor de un disolvente. — Tonometría. — Cuando se disuelve un cuerpo no volátil, en un líquido, la presión máxima F del vapor del líquido, a una temperatura dada t , desciende a un valor $F' < F$. El estudio de este fenómeno se llama *tonometría*.

Denominase *descenso relativo de la presión máxima* la relación

$$\frac{F - F'}{F}$$

Muchos experimentadores, entre los cuales citamos a Wüllner, Raoult, Tammann, etc., estudiaron las leyes de estos fenómenos. He aquí estas leyes :

El descenso relativo de la presión máxima del vapor de un disolvente por la presencia de un cuerpo disuelto es proporcional a la concentración de la solución, siempre que esta concentración sea débil; es inversamente proporcional a la masa molecular del cuerpo disuelto.

Estas leyes tienen el corolario siguiente :

Si en una masa dada del disolvente, se disuelve una molécula-gramo de un cuerpo cualquiera, el descenso relativo de la presión máxima del vapor del disolvente es independiente de la naturaleza del cuerpo disuelto.

Estas leyes son completamente análogas a las de la crioscopia*. Se expresan por una fórmula análoga** :

$$\frac{F - F'}{F} = K' \times \frac{p}{P} \times \frac{1}{M}$$

338. Influencia de una sustancia disuelta a la temperatura de ebullición de un disolvente. — Ebulloscopia. — Toda sustancia no volátil disuelta en un líquido, retrasa la ebullición, y tanto más, cuanto más concentrada es la solución. Así, el agua saturada con sal marina hierve a 109°; saturada con cloruro de calcio, no hierve sino a 170°.

Llámanse *elevación de la temperatura de ebullición* a la diferencia entre el punto de ebullición de la solución y el del disolvente, a presión dada.

Este fenómeno, cuyo estudio constituye la *ebulloscopia*, es consecuencia directa del descenso de la presión máxima de los líquidos bajo la influencia de los cuerpos disueltos. En efecto, si la presión que un líquido hirviendo soporta, permanece constante y si se disuelve en él una sustancia no volátil, se disminuye así la presión máxima del vapor del líquido. Luego será preciso para que la solución llegue a la ebullición, elevar esta presión máxima hasta la presión exterior y, por consiguiente, aumentar su temperatura.

Para las variaciones del punto de ebullición a presión constante, existen también leyes análogas a las de la tonometría. Además, de las leyes de ésta, pueden deducirse las de la ebulloscopia.

* La termodinámica demuestra, en efecto, que, entre los dos fenómenos, debe haber una *relación independiente de la naturaleza del cuerpo disuelto*.

** Esta fórmula puede aplicarse a la determinación de los pesos moleculares; pero tal método presenta todas las dificultades de la medida de presiones de vapor.

LEYES DE LA EBULLIOSCOPIA. — *El aumento de temperatura de ebullición de una solución de un cuerpo no volátil es proporcional a su concentración, mientras ésta sea pequeña; es inversamente proporcional a la masa molecular del cuerpo disuelto.*

De estas leyes se deduce la proposición siguiente: *La adición de una molécula-gramo de un cuerpo no volátil a una masa dada de un disolvente, produce un aumento de la temperatura de ebullición, independiente del cuerpo disuelto.*

Llámase *elevación molecular del punto de ebullición* la elevación de la temperatura de ebullición producida por la disolución de una molécula-gramo de un cuerpo, en 1000 gramos del disolvente. En el agua, es 0,52; 1,15, en el alcohol; 2, 15, para el éter, y 2,5 en la bencina.

Expresión de las leyes de la ebulloscopia. — Sea una solución de p gramos de un cuerpo de masa molecular M en P gramos de un disolvente, y θ la elevación de la temperatura de ebullición del disolvente por la presencia del cuerpo disuelto. Tendremos:

$$\theta = K'' \times \frac{p}{P} \times \frac{1}{M}.$$

La constante K'' depende de la presión a la cual se hace la ebullición. A la presión atmosférica normal, su valor es 520 para el agua. Para el alcohol es 1 150, para el éter 2450 y para la bencina 2 500.

Anomalías. — El fenómeno presenta las mismas anomalías que la crioscopia, en el caso de un electrólito disuelto en el agua; anomalías que se explican por la misma hipótesis.

Aplicaciones de la ebulloscopia a la determinación de las masas moleculares. — La ebulloscopia se presta muy bien a la medida de las masas moleculares. En efecto, para medir la masa molecular de un cuerpo, basta disolverlo en un disolvente a propósito, y determinar la concentración de la solución y la elevación de la temperatura de ebullición.

De la fórmula precedente, dedúcese en seguida el valor de la masa molecular.

339. Difusión de los líquidos. — Osmosis. — Presión osmótica. — Ciertos líquidos puestos en contacto se mezclan íntimamente aun en las condiciones en que la diferencia de sus densidades tendiera a mantenerlos separados. Si, por ejemplo, se llena hasta las tres cuartas partes una probeta de vidrio con tintura de tornasol dilatada (fig. 331) y se hace llegar lentamente ácido sulfúrico al fondo con un tubo de embudo, la superficie de separación del líquido incoloro y del líquido azul es al principio bien definida; pero después se ve que el tornasol pasa gradualmente al rojo de abajo arriba. Del mismo modo, cuando se echa agua azucarada en un vaso y se añade con precaución agua pura en la superficie, ésta, como menos densa, sobrenada, pero se nota la difusión lenta de ambos líquidos.

Como se ve, en este experimento, las moléculas de azúcar han manifestado una propiedad análoga a la de los gases, la de extenderse indefinidamente; sólo que un gas se extiende cuando tiene un espacio vacío y las moléculas de azúcar se extienden en el agua. De esta tendencia de las moléculas disueltas a extenderse indefinidamente resulta lo que llamamos la presión osmótica, que es análoga a la *fuerza elástica* de los gases.

La existencia de la presión osmótica se prueba con el viejo experimento de Dutrochet.

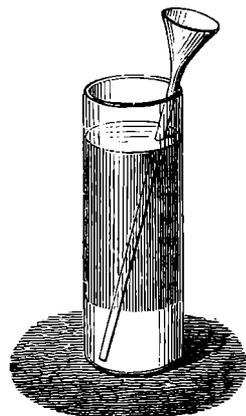


Fig. 331.

Se pone una solución de azúcar en un vaso A (fig. 332) rematado en un tubo fino y cerrado con una membrana *m*. Se le introduce en un vaso B que contenga agua pura; entonces se observa que el nivel del líquido sube en el tubo lentamente hasta el punto M. Este fenómeno ocurre porque el agua de B ha penetrado en A a través de la membrana.

En este experimento la desnivelación del líquido mide la presión osmótica si no atraviesa la membrana ninguna parte de azúcar. En efecto, no pudiendo pasar el azúcar, el agua penetra en el vaso hasta que la presión hidrostática originada haga equilibrio a la presión osmótica.

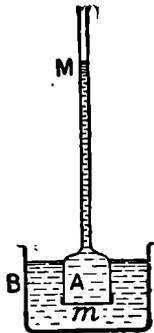


Fig. 332.

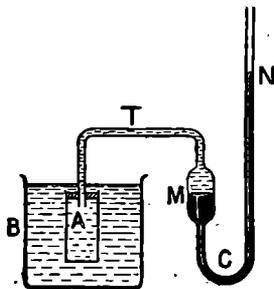


Fig. 333.

Por esta razón, para medir la presión osmótica se debe emplear una membrana adecuada: la tierra porosa, el colodión, no convienen, porque dejan pasar el cuerpo disuelto: son membranas *inactivas*. Conviene, pues, servirse de membranas *semipermeables*, o *activas*, que sólo dejan pasar el agua pero no la substancia disuelta. Las células vegetales sirven para este objeto.

Puede obtenerse artificialmente una pared semipermeable siguiendo el procedimiento de Traube, que consiste en meter un vaso poroso que contenga una solución de sulfato de cobre en otra de ferrocianuro de potasio; los dos

líquidos, al encontrarse en los poros del vaso, dan un precipitado gelatinoso de ferrocianuro de cobre, que forma una pared semipermeable.

Se puede medir la presión osmótica en altura de mercurio por el procedimiento siguiente: Se introduce un vaso semipermeable A que contenga la disolución en otro vaso B que contenga el disolvente puro (fig. 333); este comunica por un tubo T lleno de la disolución con un manómetro de aire libre C: la desnivelación MN que resulta da la medida de la presión osmótica.

Los primeros que estudiaron este fenómeno fueron Van't Hoff y Pfeffer: la ley a que obedece es la siguiente: *La presión osmótica producida por un cuerpo disuelto es igual a la presión que tendría este cuerpo si ocupara, solo en estado gaseoso, el volumen de la disolución; es independiente de la naturaleza del disolvente.*

Luego la presión osmótica sigue las leyes de los gases, especialmente las leyes de Mariotte y de Gay-Lussac.

Después de Pfeffer ha comprobado esta ley en Francia M. A. Ponsot.

Entre la presión osmótica *p*, el volumen *v* de la solución y la temperatura absoluta *T*, existe, pues, la relación

$$pv = RT.$$

Y la constante *R* puede calcularse, si se conoce la masa molecular del cuerpo disuelto, aplicando la ley de Avogadro y Ampère.

Excepciones. — Un electrólito en disolución en agua presenta siempre una presión osmótica más grande que la que se puede calcular por la ley que precede. Este fenómeno se explica por la disolución parcial del electrólito en sus iones.

Termo-ósmosis o termo-difusión. — *Experimentos de Lippmann y de Aubert.* — En 1907, demostró Lippmann experimentalmente que cuando dos masas de un líquido puro, a temperaturas diferentes, están separadas por una pared porosa, hay *ósmosis activa* a través de la membrana. Este fenómeno, debido únicamente a las diferentes temperaturas, constituye la *termo-ósmosis* de los líquidos.

M. Aubert* ha demostrado que las membranas activas se reparten en dos grupos:

- 1º Las membranas *positivas* (gelatina, vejiga) en las cuales la corriente va del líquido frío al líquido caliente, es decir en sentido contrario de la baja de temperatura;
- 2º Las membranas *negativas* (papel pergamino, viscosa): la corriente, inversa de la anterior, va del líquido caliente al frío, es decir que tiene el mismo sentido que la baja de temperatura.

La termo-difusión está ligada a la existencia, en las membranas, de substancias que tienen afinidad con el líquido del experimento. A una membrana activa se la puede

* Aubert: *Tesis de doctorado*, 1912.

volver inactiva (vejiga de puerco limpia al vapor de agua, pergamino limpio al alcohol metílico). Recíprocamente, a una membrana inactiva (colodión) se la puede volver activa si se introducen substancias salinas solubles (acetato de potasio).

Para una diferencia de presión determinada Δp entre las dos masas líquidas y para un valor dado Δt de la diferencia de temperatura, el rendimiento no permanece constante: disminuye en progresión geométrica cuando el tiempo crece en progresión aritmética.

Termo-ósmosis de los gases. — *Experimentos de Lippmann.* — En 1907, Lippmann demostró que cuando se ponen dos masas de un mismo gas de diferentes temperaturas, de una y otra parte de una pared porosa, hay *ósmosis del gas frío al gas caliente*.

CAPÍTULO XII

HIGROMETRÍA

340. Definiciones. — *Higrometría* es la parte de la Física que tiene por objeto la determinación de la proporción de vapor de agua contenida sea en la atmósfera, o sea en un volumen determinado de ésta.

En general, el aire no está saturado. Llámase *estado higrométrico o fracción de saturación del aire, la relación entre la presión f del vapor de agua que contiene y la presión F que tendría el vapor de agua a la misma temperatura, si el aire estuviera saturado* (es decir, la presión máxima del vapor a esta temperatura).

También se define así el *factor de evaporación* $F - f$ (290) de que depende la velocidad de evaporación.

Se da el nombre de *higrómetros* a los aparatos que sirven para determinar el estado higrométrico del aire.

341. Higrómetros de condensación. — **Higrómetro Alluard.** — Si se enfría progresivamente un cuerpo colocado en una atmósfera no saturada, llega un momento en que el aire que está en contacto con la superficie del cuerpo, y que se enfría al mismo tiempo que él, alcanza la temperatura en que su vapor de agua sería saturante. Este vapor se fija entonces en *vaho o rocío* en la superficie enfriada. La temperatura que, entonces, posee el cuerpo, se denomina *punto de rocío*.

De ahí, puede deducirse el estado higrométrico. En efecto, durante el enfriamiento, la presión del vapor de agua permanece constante, lo mismo que la presión atmosférica. Por consiguiente, si se busca, en las tablas de Regnault, la presión máxima f , correspondiente a la temperatura del punto de rocío, esta presión será precisamente la que posee el vapor de agua en la atmósfera. Sacando, de las mismas tablas, la presión máxima F correspondiente a la temperatura exterior del aire, se obtendrá el estado higrométrico e de la atmósfera, efectuando el cociente de f por F^* .

* *Ejemplo.* — Siendo 15° la temperatura del aire, supongamos que se haya determinado un *punto de rocío* igual a 5° . En las tablas, se halla, para f y F , los números 6,544 mm. y 12,600 mm.; el cociente es 0,51. Luego $e = 0,51$.

Los higrómetros de *condensación*, fundados en este principio, sólo difieren entre sí por la mayor o menor facilidad de producir el rocío y por la precisión en la observación del punto de rocío.

El método fué aplicado primero por Leroy. Los aparatos han sido perfeccionados sucesivamente por Daniell, Regnault, Alluard, Crova, etc.

Entre los aparatos actualmente empleados, describiremos con preferencia el higrómetro de Alluard.

Se distingue por los dos detalles siguientes: 1º la región en donde debe observarse el depósito de rocío es una *cara plana* A (fig. 334), bien lisa, de plata o de latón dorado; 2º esta cara tiene por marco una lámina de plata o latón B, dorada y lisa también, que no la toca, y que, no enfriándose nunca, conserva siempre el mismo brillo. De esta yuxtaposición resulta que el depósito de rocío se observa con tanta claridad en la superficie A, que apenas se encuentra diferencia entre la temperatura del depósito y la de desaparición del rocío.

El aparato tiene la forma de un prisma recto de base cuadrada. La tapadera superior está atravesada por tres pequeños tubos de cobre CG, DF, y E; CG penetra hasta el fondo, y los otros dos desembocan en la parte superior. El tubo E está provisto de un embudo para introducir el éter. Se

hace evaporar rápidamente el éter insuflando por el tubo CG una corriente de aire procedente de un fuellecito de sople continuo. El aire cargado de vapores de éter es expulsado lejos del aparato por un tubo de caucho adaptado en I.

La evaporación del éter hace bajar la temperatura del vaso. Una tubulura central deja pasar un termómetro *t*, que, estando en medio del éter, da exactamente su temperatura, la cual se anota en el momento en que aparece el vaho, y así se tiene el punto de rocío. El termómetro *t'* da la temperatura ambiente. Conviene observar de lejos, valiéndose de un antejo, a fin de que la respiración del operador no pueda modificar el estado higrométrico del aire que rodea el instrumento.

342. **Psicrómetro.** — El *psicrómetro* da a conocer indirectamente el grado de humedad de la atmósfera por la velocidad de la evaporación que sufre un cuerpo mojado expuesto en ella.

El aparato se compone de dos termómetros (fig. 335), colocados paralelamente en una placa de cobre a una y otra parte de un tubo que

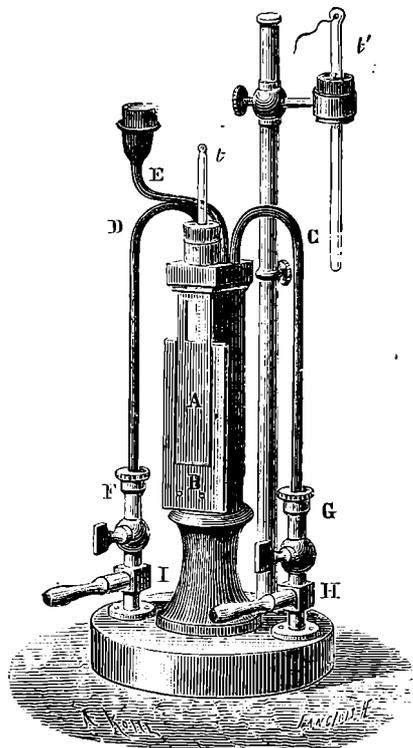


Fig. 334.

contiene agua destilada. El depósito se envuelve en una muselina : una mecha de algodón que arranca de la extremidad inferior del tubo lleva el agua hasta la muselina y la mantiene húmeda. Enfriado de esta manera por la evaporación que se produce en su superficie, el termómetro mojado marca constantemente una temperatura inferior a la del termómetro seco, la diferencia es tanto mayor cuanto más rápida es la evaporación, y, por consiguiente, cuanto más alejado está el aire de su punto de saturación. De esta diferencia de las temperaturas ($t - t'$) se deduce la presión f del vapor en el aire ambiente.

Fórmula de psicrómetro. — Para este caso se utiliza la ecuación

$$[1] \quad A(t - t') = \frac{F' - f}{H},$$

de donde se deduce

$$[2] \quad f = F' - AH(t - t'),$$

en que t representa la temperatura del termómetro seco, t' la del húmedo, F' la presión del vapor saturado a t' grados, H la presión atmosférica, y A un coeficiente que es constante para el mismo aparato.

Esta ecuación expresa que *el calor recibido por el termómetro húmedo* (que es proporcional a la diferencia $t - t'$; es igual al calor sustraído por la evaporación (el cual es, según Dalton, directamente proporcional a la diferencia $F' - f$ e inversamente proporcional a H).

Graduación. — Se empieza por determinar A : para ello se efectúa un primer experimento en que se mide directamente f , por medio de un higrómetro ; después se pone el valor hallado de este modo en lugar de f en la ecuación [1], que da para valores particulares de $(t - t')$, F' y H , el valor desconocido de A . Una vez despejada esta constante, la fórmula [2] puede servir.

Crítica del aparato. — Regnault observó que el coeficiente A no es absolutamente constante para un mismo aparato ; varía en particular con la velocidad del viento que le hiere, y con el lugar donde el aparato se encuentra colocado. Además, a la temperatura de 0° y por debajo de ella, no es posible contar en manera alguna con su exactitud. Este es un gran inconveniente en las observaciones meteorológicas. Dase más constancia a las indicaciones del instrumento si se mueve rápidamente el termómetro mojado en el aire, por ejemplo dándole vueltas atado a la punta de una cuerda (*psicrómetro honda*). Entonces la velocidad de evaporación alcanza un valor límite que sólo depende del estado de humedad de la atmósfera.

343. Higrómetro de cabello. — El *higrómetro de cabello*, inventado por Saussure, ya no tiene más que interés histórico.

Compónese de un cabello c mantenido tenso en un marco de cobre (fig. 336), que se estira con la humedad y se encoge con la sequía. En su parte superior está sujeto por una pinza y se arrolla en una polea de dos gargantas o , a la cual está sujeto por la otra punta. Por fin, el eje de la polea mantiene una aguja que se mueve sobre un cuadrante graduado.

Cuando se acorta el cabello, su contracción levanta la aguja ; si se alarga, el peso p la obliga a bajar.

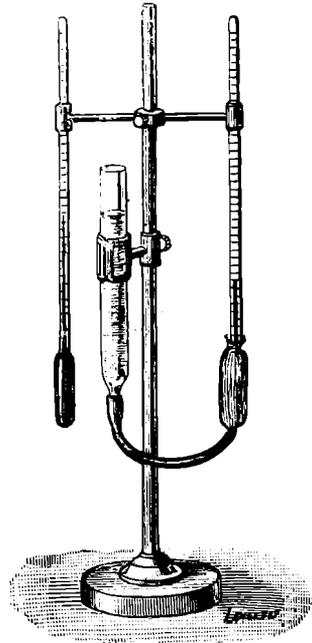


Fig. 335.

El cuadrante está dividido por comparación con un higrómetro de condensación.

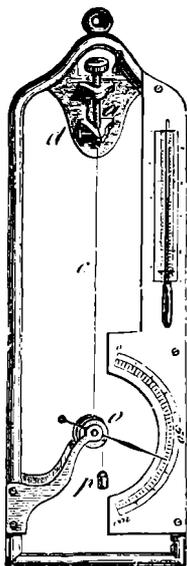


Fig. 336.

A este aparato se le dan formas variadas. Su principal defecto reside en las modificaciones que sufre el cabello, de donde resulta que el aparato no es comparable a sí mismo. Se ha perfeccionado, introduciendo un haz de cabellos, en vez de uno solo. Los efectos de las variaciones individuales se compensan aproximadamente.

344. **Higrómetro registrador.** — Se construyen higrómetros registradores, fundados también en las variaciones de longitud de los cabellos, por la influencia de la humedad o la sequía.

La figura 337 representa un higrómetro registrador de Richard. El cabello F está fijo por sus dos extremos. Por el centro, se halla unido a una palanca AOC móvil alrededor del eje O. OC es una espiga que apoya en otra C' que forma, con la punta inscriptora, una palanca móvil alrededor de O'. El alargamiento del cabello no es proporcional al estado higrométrico, por lo cual se da a las espigas forma conveniente para que el movimiento de S sea, por el contrario, proporcional al

estado higrométrico.

345. **Fórmulas relativas a la higrometría.** — Calcular la masa P de un volumen de aire húmedo V cuyo estado higrométrico es e, la temperatura t y la presión H.

Sea f la presión del vapor de agua en el aire. Se tiene $f = Fe$, siendo F la presión máxima del vapor de agua correspondiente a la temperatura t. Esta presión F se

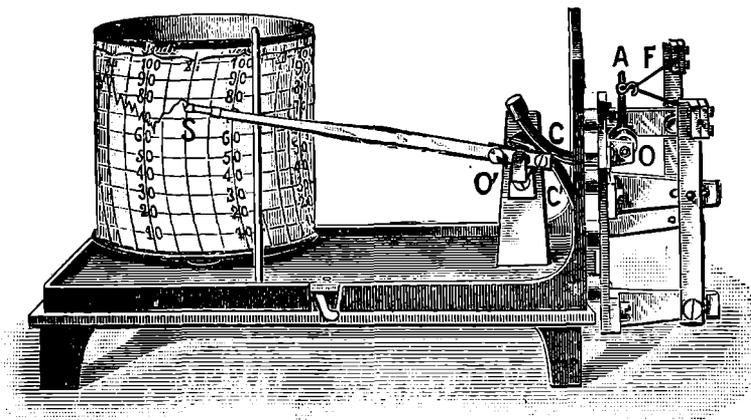


Fig. 337.

encuentra en las tablas de Regnault. El volumen de aire dado no es más que una mezcla de Vem^3 de aire seco a t'' y bajo una presión $H - f = H - Fe$ y de Vem^3 de vapor a t'' y bajo la presión $f = Fe$.

Las masas respectivas m' y m de aire y de vapor estarán dadas por las fórmulas siguientes :

$$[1] \quad m = 0,001293 \frac{V(H - Fe)}{76(1 + \alpha t)}$$

$$[2] \quad m' = 0,001293 \times 0,622 \frac{VFc}{76(1 + \alpha t)};$$

de donde fácilmente se deduce :

$$[3] \quad M = m + m' = 0,001293 \frac{V(\Pi - 0,378 Fc)}{76(1 + \alpha t)}.$$

Cuando el aire está saturado $e = 1$, fórmula que hemos visto (304).

CAPÍTULO XIII

MÁQUINAS TÉRMICAS

346. Máquinas de vapor. — Principio. — Generadores de vapor. — La máquina de vapor es una aplicación del principio de que si se calienta agua en una caldera cerrada, la presión máxima del vapor es superior a la presión atmosférica y tanto más cuanto más se eleva la temperatura por cima de 100° (287). Esta presión se utiliza como fuerza motriz.

Generadores de vapor. — Para producir las grandes cantidades de

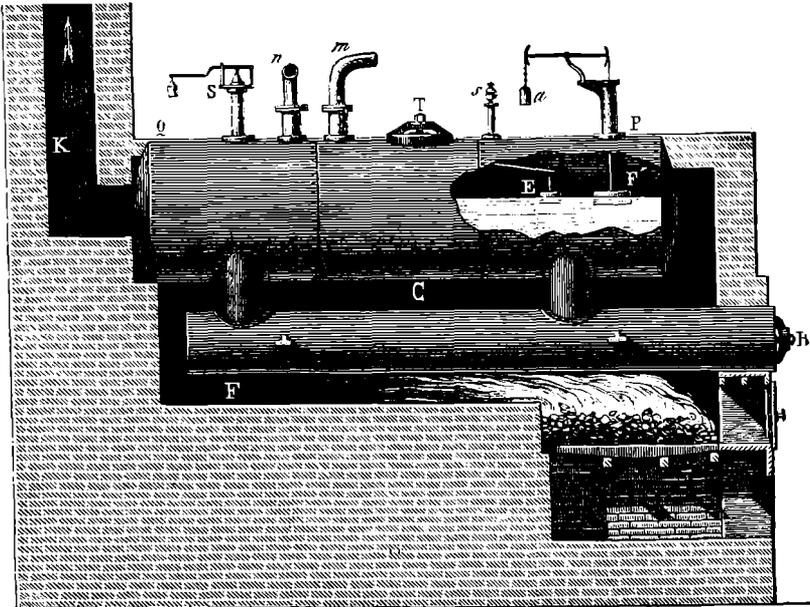


Fig. 338.

vapor necesarias al funcionamiento de las máquinas, los generadores deben tener grandes dimensiones y presentar superficies considerables al contacto de los gases calientes del fogón. Se les monta en una construcción de metal o de mampostería que concentra sobre ellos las llamas de un intenso fogón.

1^o *Calderas de hervideros.* — Consiste en un cilindro largo de palastro PQ (fig. 338),

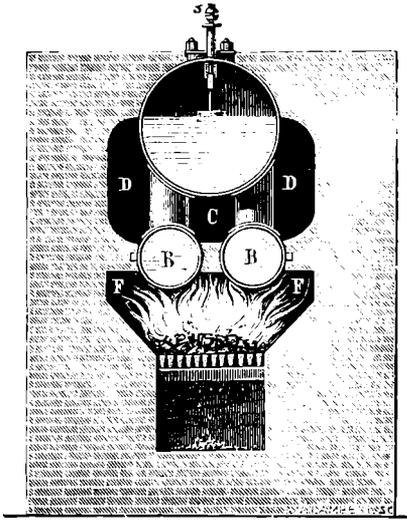


Fig. 339.

cerrado en ambos extremos por dos casquetes esféricos. Debajo hay dos cilindros BB (*herveros*) fig. 338 y 339, de diámetro más pequeño, de palastro también, cada uno de los cuales comunica con el generador por dos tubos. Destinados a recibir el fuego del fogón, están completamente llenos de agua, mientras que el cilindro PQ lo está un poco más de la mitad. Debajo de los hervideros está el *fogón*, alimentado por carbón de piedra o de cok. Los productos de la combustión circulan por conductos de ladrillos que rodean las paredes de los hervideros y del generador y dividen el hornillo en dos compartimientos horizontales FF y CD.

La llama y los productos de la combustión se dirigen por fin por los conductos laterales DD al tubo K de la chimenea.

2^o *Calderas tubulares de agua.* — Para ir más lejos todavía en la reducción de las dimensiones exteriores y aumentar por el contrario la superficie de calefacción, se han construido calderas compuestas *únicamente de tubos*, en torno de los cuales circulan las llamas del fogón (fig. 340).

El agua de alimentación es conducida por el tubo D, de acero fundido, dividido en dos compartimientos separados por un tabique. El agua menos caliente baja poco a poco al compartimiento E y corriendo por el tubo

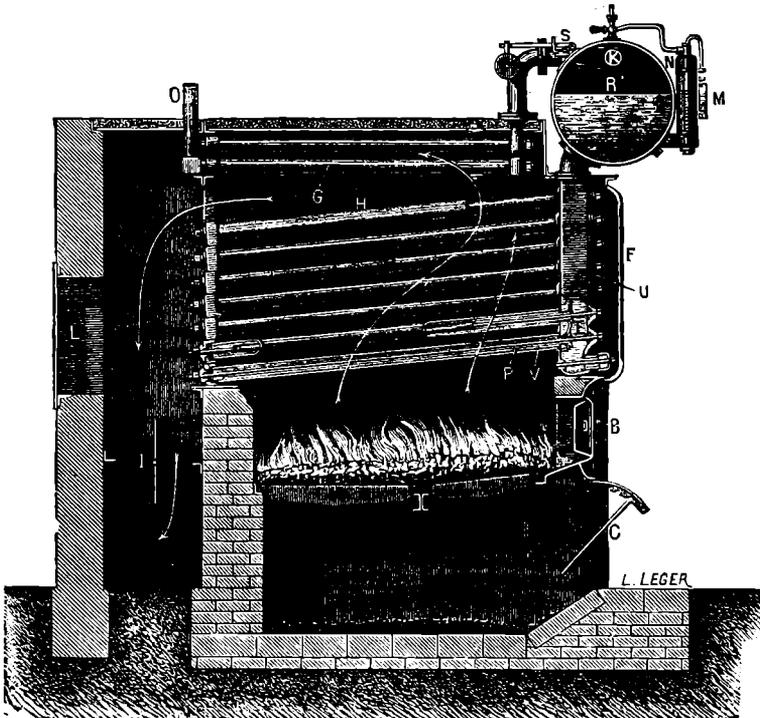


Fig. 340.

central P, llega a su extremo en el tubo envolvente V, donde queda en contacto con el fuego. Esta agua, caliente y mezclada de vapor, sube por el tubo exterior V, y luego,

pasa al compartimiento J del colector hasta el depósito R, donde el vapor se desprende. El vapor, al salir del depósito R, atraviesa los tubos G, llamados *recalentadores* de vapor. Estos tubos forman un serpentín aplanado donde el vapor abandona, antes de dirigirse a la máquina, las gotas de agua que la vaporización ha arrastrado a circular en torno de los tubos recalentadores, aumentándose así el rendimiento.

3º *Calderas Serpollet o de generación instantánea.* — M. Serpollet logró construir generadores compuestos de un simple tubo de paredes muy gruesas y aplanado sobre sí mismo.

En estas condiciones, aunque la longitud del tubo sea bastante grande, la capacidad de la caldera es casi nula, mientras que la superficie de calefacción es considerable. De ahí resulta que el agua que en ella se introduce se vaporiza *instantáneamente* y que precisa renovarla sin descanso, a medida que el vapor es utilizado en la máquina.

Tienen estos generadores la ventaja de permitir la producción del vapor a alta presión y, por otra parte, su explosión sería enteramente inofensiva, por ser insignificante la cantidad de vapor que contienen.

4º *Calderas tubulares de las locomotoras.* — Las exigencias de la tracción necesitan, para las *máquinas locomotoras*, calderas de poco volumen relativo y de gran potencia

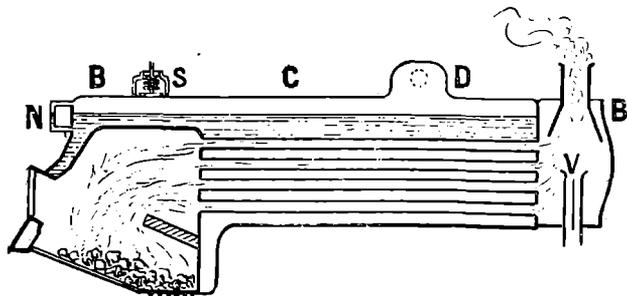


Fig. 341.

de vaporización. En las calderas locomotoras, el fogón (fig. 341) está en medio de una caja de cobre, rodeada de la *caja de fuego* B, y el espacio intermedio contiene el agua que se ha de vaporizar.

Antes de dirigirse a la chimenea, los gases calientes y la llama deben recorrer tubos colocados en el cuerpo cilíndrico C, y que también están rodeados de agua por todas partes. Los tubos desembocan en la caja de humo B', de donde salen los gases por la chimenea. Como esta es necesariamente muy baja (a causa del paso bajo puentes y túneles), se activa el tiro, que sería muy débil, por el chorro de vapor que sale por V.

Las calderas de las potentes locomotoras modernas tienen una superficie de combustión que llega a 300 m² (15 a 16 m² para la caja de fuego, el resto para los tubos, cuyo número varía de 120 a 300, comprendida su longitud entre 4 y 6 metros): pueden contener hasta 9 000 litros de agua y vaporizar 8 000 por hora; la presión llega a 16 kg. por cm².

Además, muchas locomotoras modernas tienen un recalentador; el vapor que sale del domo D circula por un haz tubular contenido en los tubos superiores de la caldera.

5º *Organos accesorios de las calderas.* — Todas las calderas llevan una *válvula de seguridad* S (fig. 338, 340, 341) que deja salir el vapor cuando la presión resulta muy grande. En las calderas fijas la válvula está sujeta a su asiento por un peso pendiente de una palanca (fig. 338 y 340), y en las calderas locomotoras está sujeta por un muelle muy fuerte (fig. 341).

Las calderas tienen además un *indicador de nivel* del agua N (fig. 340 y 341); es un tubo de cristal que comunica por abajo con el agua y por arriba con el vapor; así se ven las variaciones del nivel del agua, para reemplazarla a medida que se vaporiza. Finalmente, un manómetro de Bourdon M (fig. 340) indica la presión del vapor.

347. **Máquina de vapor propiamente dicha.** — *Cilindro y émbolo.* — El órgano esencial de la máquina de vapor es un cilindro (fig. 342) en el que se mueve un émbolo PP'. El cilindro tiene cuatro orificios que pueden ser cerrados o abiertos por llaves colocadas en AB, AB'. A y B comunican de manera permanente con la caldera; A' y B' comunican

con el exterior. Abramos A y B'; la presión del vapor actúa sobre la cara P del émbolo. El émbolo se mueve de izquierda a derecha.

Cuando el émbolo está al fin de su marcha se cierran A y B' y se abren A' y B: el vapor ejerce su presión sobre la cara P', el émbolo se pone en movimiento en sentido inverso y el vapor contenido en la izquierda sale afuera. Luego abriendo y cerrando alternativamente las llaves se obtendrá el movimiento alternativo del émbolo.

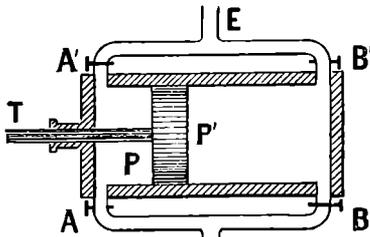


Fig. 342.

Cálculo del trabajo y de la potencia. — Sean P la presión en la caldera, p la presión atmosférica, S la superficie del émbolo, lm la longitud de su carrera, n

el número de carreras por segundo. La fuerza que el vapor ejerce sobre el émbolo es PS , pero, por el otro lado, la presión atmosférica ejerce una fuerza antagónica pS , de modo que la fuerza que mueve el émbolo es $F = (P - p) S$.

El trabajo por carrera es $T = Fl = (P - p) Sl$; el trabajo por segundo, que mide la potencia, es

$$P = Tn = (P - p) Sln.$$

Ejemplo numérico. — Supongamos $S = 500 \text{ cm}^2$ y $P = 10 \text{ kg. por cm}^2$ ($p = 1 \text{ kg. por cm}^2$), $l = 0,50 \text{ m.}$, $n = 4$ (2 idas y 2 vueltas por segundo). La fuerza F tiene por valor $F = 500 \times (10 - 1) = 4\,500$ kilogramos-peso. El trabajo del vapor, por cada movimiento del émbolo es $4\,500 \times 0,50 = 2\,250$ kilográmetros, o $2\,250 \times 9,81 = 22\,072$ julios. La potencia es $2\,250 \times 4 = 9\,000$ kilográmetros por segundo, sea $\frac{9000}{75} = 120$ caballos-vapor, u 88,3 kilovatios.

Transformación del movimiento alternativo en movimiento de rotación. — Algunas veces se utiliza directamente el movimiento alternativo del émbolo, por ejemplo, cuando se quiere mover una bomba por medio de una máquina. Entonces, se juntan las varillas de los émbolos de la máquina de vapor y de la bomba (fig. 226). Pero, generalmente, se transforma el movimiento alternativo en un movimiento de rotación continuo. La varilla del émbolo (fig. 343) atraviesa con frotamiento suave una caja de cuero impermeable colocada en el fondo del cilindro, la cual efectúa su movimiento rectilíneo por una ranura; la varilla donde está articulada se llama *biela*, que, a su vez, está unida a un manubrio m , que gira al rededor de un eje llamado *árbol*, solidario de una rueda grande llamada *volante*. Viendo el grabado se comprende cómo el movimiento rectilíneo del vástago del émbolo puede producir por medio de la biela y el manubrio el movimiento de rotación del volante, por lo menos cuando el manubrio no está en prolongación directa con la biela y el vástago del émbolo. Respecto de estas dos posiciones que resultan cuando el émbolo llega a los extremos de su

marcha, y que se llaman *puntos muertos*, el movimiento del émbolo no es capaz de continuar el movimiento de rotación. Pero gracias a la energía cinética que el volante ha acumulado antes, sigue dando la vuelta pasando los puntos muertos y, así, resulta el movimiento rotatorio continuo. La pesada masa del volante regulariza al mismo tiempo el movimiento de la máquina (99).

Distribución del vapor. — Excéntrica y caja. — En ciertas máquinas, aun las más perfeccionadas, la distribución del vapor sobre las dos caras del émbolo, así como su salida afuera, se efectúa todavía por medio de llaves automáticas gobernadas por la misma máquina. Pero casi siempre esta distribución se efectúa por medio de un órgano especial llamado *caja de distribución*.

El vapor llega a esta caja de distribución B (fig. 343) en cuyos

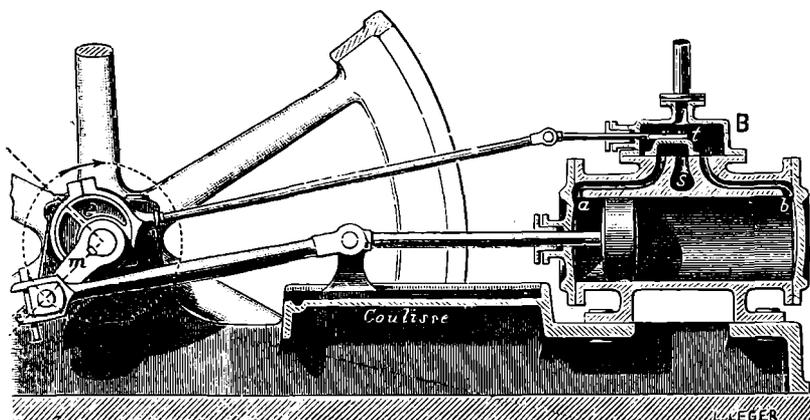


Fig. 343.

extremos *a* y *b* hay unos conductos practicados en la pared del cilindro; otro tubo S comunica con la atmósfera; en la caja se mueve el distribuidor con movimiento alternativo. Cuando se encuentra en la posición indicada en la figura, pone en comunicación *b* con la caldera y *a* con la atmósfera; pero cuando el émbolo llega al extremo de su marcha, el distribuidor se coloca hacia la derecha, resultando las comunicaciones inversas.

Excéntrica. — Este órgano se compone de una pieza circular *e* en cuyo contorno hay una garganta donde encaja un collar que la rodea por completo y puede girar libremente. Está fijo a un vástago de metal unido al del distribuidor. Esta pieza se adapta al árbol alejando más o menos su centro de figura del centro del árbol; así, se obtiene, por cada vuelta del árbol, un vaivén del vástago igual a dos veces la distancia que separa ambos centros.

Pero este movimiento no es uniforme, sino que es más rápido en las dos posiciones en que la línea que une el centro de rotación al de figura de la excéntrica es perpendicular a su vástago. Por eso el movimiento del distribuidor se efectúa bruscamente en esas dos posiciones. Por

consiguiente es preciso calzar la excéntrica de manera que la recta que hemos definido sea perpendicular al manubrio *.

Distribuidor cilíndrico. — El distribuidor que acabamos de describir soporta la presión del vapor, que le aplica con mucha fuerza contra la pared del cilindro, lo cual produce un rozamiento considerable. Hoy día se le reemplaza generalmente por el *distribuidor cilíndrico*. En este caso la caja de distribución es un cilindro en el que se mueven dos pistones solidarios p p' , que reemplazan la corredera ordinaria. La figura 344 da a comprender el funcionamiento de esta disposición.

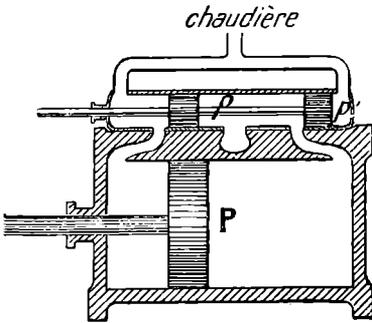


Fig. 344.

348. **Condensador.** — La presión atmosférica ejerce sobre una de las caras del émbolo una fuerza antagónica. Watt ha tenido la idea de reducir esta fuerza poniendo la salida S del vapor en comunicación, no con la atmósfera, sino con un depósito frío llamado *condensador*, en el cual se condensa el vapor, y la presión p que allí existe es la presión máxima correspondiente á su temperatura. Si ésta es de 50° , por ejemplo, la presión es algo superior a 100 gramos por centímetro cuadrado; por consiguiente, es 10 veces más pequeña que la presión atmosférica. En las fórmulas (347) p representa la presión que existe en el condensador.

Al condensarse el vapor, aporta una cantidad de calor considerable al condensador, que se calentaría rápidamente si no se le enfriase continuamente introduciendo agua fría por medio de una bomba movida por la máquina. Una bomba o un inyector Giffard llevan a la caldera el agua condensada y la introducida, con lo que resulta economía de combustible. En otros casos se enfría el condensador exteriormente con una corriente de agua de mar, como se hace con las máquinas marinas.

En fin, como siempre entra un poco de aire en el condensador, sea con el agua inyectada, sea por las fugas, es necesario, para mantener el vacío parcial que debe existir, extraer ese aire con una bomba de vacío.

Siendo el condensador pesado y estorboso, sólo se le puede emplear en

* *Avance por admisión.* — En la práctica, es preciso que el orificio de admisión b quede abierto un poco antes de que el émbolo, andando en el sentido *ab* llegue al fondo de su carrera. Esto se consigue aumentando un poco el ángulo de la excéntrica. De este modo, evítase la *laminación* del vapor, es decir, su paso por una abertura demasiado estrecha; además, admitido el vapor antes del golpe de émbolo, forma almohadillado e impide que éste se detenga bruscamente en el momento del cambio de dirección, lo cual sería muy perjudicial para el conjunto de las demás piezas.

Avance por escape. — No puede realizarse el avance por admisión sin, al mismo tiempo, establecer, al otro lado del émbolo, un *avance por escape*. Por otra parte, es necesario empezar la evacuación del vapor que acaba de trabajar antes del cambio de dirección, para que no ofrezca resistencia al movimiento inverso. Por la misma razón, conviene practicar anchos orificios de escape. En consecuencia, sobre el cristal de distribución, se estableció la abertura S de evacuación, más ancha que los orificios de admisión.

máquinas fijas; por eso no lo tienen **las** locomotoras, y el escape se verifica al aire libre.

349. **Expansión del vapor.** — Watt ha imaginado suprimir la llegada del vapor cerrando la **abertura** por donde entra, hasta tanto que el émbolo no haya llegado al extremo de su marcha. El vapor continúa empujando el émbolo; pero a medida que aumenta su volumen, va disminuyéndose su presión: entonces se dice que se dilata.

De modo que con la misma cantidad de vapor se obtiene **más** trabajo. En efecto, supongamos que se suprime la llegada del vapor cuando el émbolo se encuentra a la mitad de su marcha; en ese caso, se habrá obtenido ya con la mitad del vapor que hubiera exigido la marcha completa del émbolo, la mitad del trabajo que se hubiera requerido; mas, como el vapor sigue trabajando durante su *expansión*, resulta que se obtiene un trabajo superior a la mitad, con más economía de vapor y por consiguiente de combustible. Se comprende que **la** marcha de la máquina es tanto más económica cuanto mayor es la expansión, es decir cuanto más pronto se suprime la llegada del vapor.

Pero, por otra parte, disminuye en otro tanto el trabajo que la máquina puede rendir en un tiempo dado. Por eso, el maquinista tiene a su disposición medios de arreglar la expansión. Sin embargo, en muchas máquinas, la expansión es *fija*.

OBSERVACIÓN. — El enfriamiento del vapor por su expansión trae consigo la condensación parcial, disminuyendo así la presión. Esto se produce desde los primeros instantes de la expansión cuando el vapor está saturado. Con el vapor *sobrecalentado*, o *seco*, se disminuye considerablemente la condensación, resultando así aumento notable de rendimiento.

350. **Máquinas de expansión múltiple.** — Para obtener, con el vapor, el **máximo** de trabajo, sería necesario que cuando el émbolo llega a lo alto de su carrera, la presión fuese igual a la que existe en el condensador. Para acercarse a esta condición, tiene que ser la expansión muy grande. Pero, si no se emplease más que un solo cilindro, éste debería ser muy largo. Se ha salvado esta dificultad haciendo llegar el vapor que aun no se ha expansionado del todo, a un segundo cilindro donde actúa sobre otro émbolo. Este último cilindro debe tener mayor diámetro que el primero, porque, como el vapor que admite tiene menor presión, tiene también volumen más grande y, por otra parte, las carreras de ambos émbolos deben ser iguales. El vapor que sale del segundo cilindro es transportado al condensador. Las máquinas que utilizan este principio se llaman máquinas de *dobles expansión*. Las más usadas son las Compound, en las cuales hay un depósito intercalado entre los dos cilindros, al paso del vapor.

A fin de aumentar aún más la expansión del vapor, se han creado modelos de triple y hasta de cuádruple expansión, en donde el vapor trabaja en tres o cuatro cilindros de diámetro creciente.

Estas son las máquinas que producen mayor *rendimiento*. De este modo, se ha llegado a construir máquinas que consumen de 3 a 6 kg.

de vapor por caballo y por hora, lo cual corresponde a un gasto de 0,700 kg. de carbón próximamente.

351. **Organos accesorios.** — 1º *Bombas de alimentación.* — La máquina misma es la que alimenta de agua la caldera, moviendo una bomba aspirante e impelente.

2º *Injector Giffard.* — Generalmente la bomba de alimentación es reemplazada por el

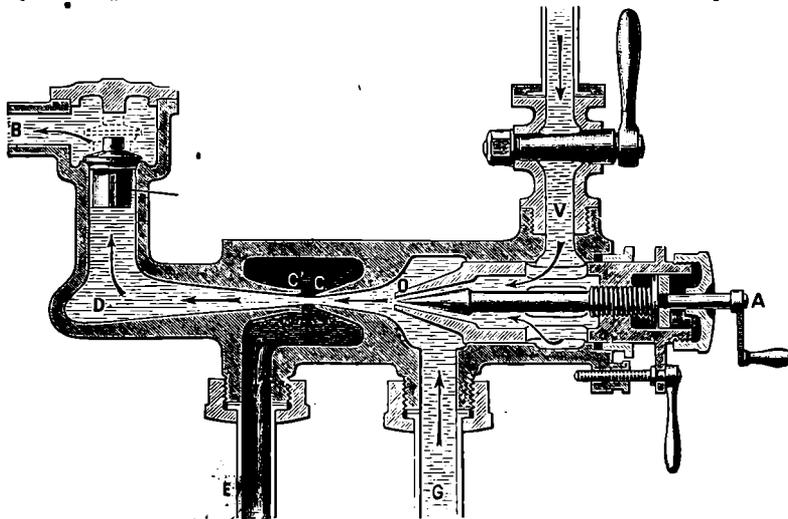


Fig. 345.

inyector que inventó Giffard. La parte esencial del mismo es un par de conos divergentes CC' (fig. 345) que constituyen una especie de trompa de vapor de agua, análoga a las de agua ó de mercurio.

El vapor de agua viene de la caldera por el tubo V, a alta presión, y como está obligado a salir por el pequeñísimo orificio O, adquiere, al hacerlo, gran velocidad. A su salida, tropieza con el agua que procede del depósito de alimentación por el tubo G, la impulsa delante de sí, a la vez que se condensa en ella, y produce, de este modo, una aspiración *continua* que hace subir el líquido por el tubo G. Al mismo tiempo, el agua que ha recibido el impulso del chorro de vapor, mezclada con la que resulta de la condensación del chorro, penetra en la interrupción CC' donde pierde el aire que contiene, y llega al tubo de alimentación D que la conduce a la caldera por B.

3º *Regulador de fuerza centrífuga.* — El movimiento de las máquinas de vapor tiende incessantemente a acelerarse o retardarse, según las variaciones del trabajo motor y del trabajo resistente. Para mantener constante la velocidad, se emplea en general un *regulador de fuerza centrífuga*. Este tiene por efecto, sea como en el sistema de Watt, hacer variar la presión del vapor antes de su entrada en el cilindro, sea como en las máquinas actuales (por ejemplo, en las de distribuciones de pestillo), aumentar o disminuir el volumen de vapor recibido en el cilindro a cada golpe de émbolo.

En un árbol vertical (fig. 346), que gira con velocidad proporcional a la de la máquina, se articulan dos brazos terminados por su parte inferior en unas bolas metálicas. Apenas entra en rotación el árbol vertical, aquéllas tienden a separarse de él, por un efecto de la fuerza centrífuga, y a tomar una posición de equilibrio dependiente de la velocidad (83). Las bielas articuladas a un cubo D que encaja en el árbol vertical, comunican este movimiento y lo transmiten al mecanismo de distribución por la palanca DOT.

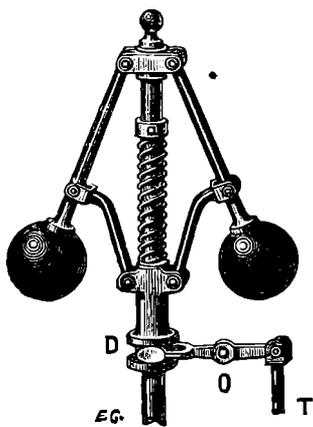


Fig. 346.

1º *Corredera de Stephenson.* — Este mecanismo (fig. 347) se compone, en principio, de dos platillos circulares y excéntricos, reunidos y adaptados sobre el árbol de la máquina según un ángulo determinado. Cada uno de ellos está rodeado por un collar de bronce A y A' donde da vueltas y enlazado por medio de una biela, con la extremidad de la corredera propiamente dicha BB'. La corredera cuelga por la regla PB' de la punta de una palanca acodillada HNP, y está equilibrada por el contrapeso Q. Gracias a la palanca MK y al vástago GH se puede subir o bajar la corredera. De ahí resulta que como el eje de gobierno T del vástago del cajón permanece al mismo nivel, puesto que se encuentra fijo en la extremidad de la palanca E, el cajón es guiado ya por la excéntrica A, ya por la excéntrica A', según que esté abajo o arriba la corredera. Es evidente que en

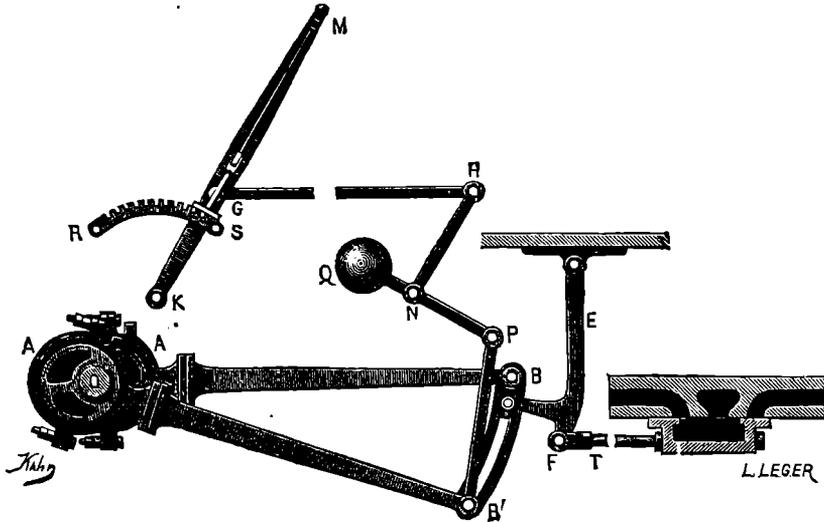


Fig. 347.

una posición intermedia y no obstante el movimiento de las dos excéntricas, el punto F no se movería y que, por consiguiente, no se verificaría la distribución del vapor.

Por supuesto, en las máquinas de expansiones múltiples es necesario que el sentido de la distribución cambie al mismo tiempo en todos los cilindros.

352. *Perfeccionamientos en el mecanismo de las máquinas de simple expansión.* — En la construcción de las máquinas de vapor de simple expansión se ha introducido gran número de perfeccionamientos; vamos a indicar los principales :

1º *Recalentamiento del vapor.* — El cilindro C (fig. 348), donde el vapor al dilatarse o concentrarse impulsa el émbolo, está rodeado por una circulación de vapor procedente de la caldera. Esto permite llevar más lejos la expansión del vapor impidiendo que se convierta en agua.

2º *Distribución del vapor.* — Se han remediado los inconvenientes del cajón de Watt dotando a la máquina de cuatro cajones en vez de uno solo. Colócaselos completamente contra los fondos mismos del cilindro, de modo que supriman casi totalmente los espacios perjudiciales. Por otra parte, como cada cajón tiene su función propia, sea la introducción, sea la salida del vapor, evitase el enfriamiento del vapor motor por el que ya ha trabajado.

3º *Distribuidores.* — Los distribuidores son grandes llaves por medio de las cuales se abre ó se cierra el paso del vapor por un simple movimiento de rotación. Se usan cuatro distribuidores : dos se encargan por turno de poner los dos extremos del cilindro en comunicación con el condensador; los otros dos introducen el vapor solamente en el instante y durante el tiempo necesarios.

Máquina de vapor horizontal fija. — En el tipo moderno de máquinas de vapor, se ha realizado gran número de perfeccionamientos, representados en la figura 348.

Explicación de la figura 348. — A, depósito rectangular, donde se difunde el vapor que llega por la válvula R. En cada extremo están fijos los distribuidores DD que abren ó cierran el paso del vapor al cilindro, según los movimientos que les imprimen las bielas tt'; B, depósito rectangular análogo al depósito A; pero destinado a recibir el vapor de salida cuando es puesto en comunicación con los cilindros por los distribuidores

D' D'; C, cilindro propiamente dicho donde se mueve el émbolo. Está protegido contra el enfriamiento exterior, así como los depósitos A y B, por un revestimiento de madera.

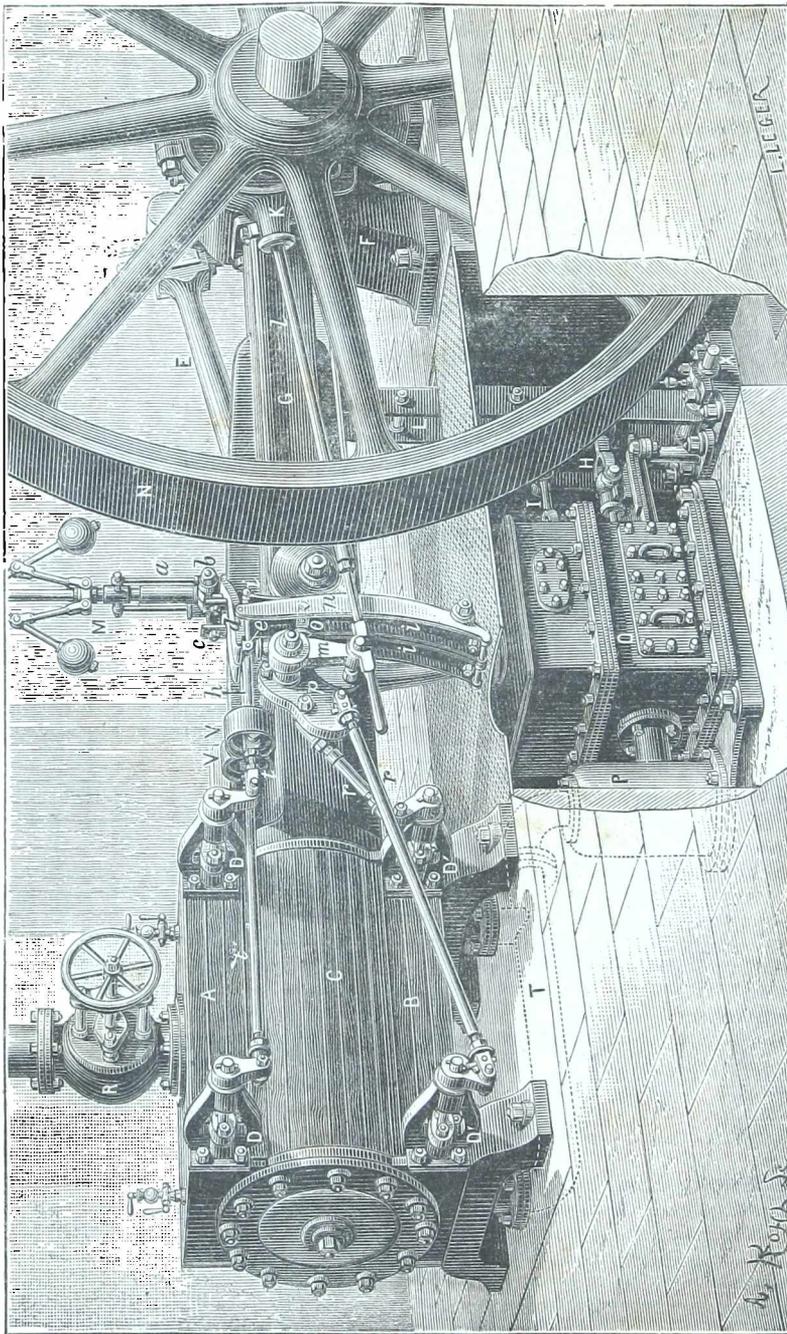


Fig. 348.

Además, es de doble pared, y el vapor recién llegado de la caldera, al circular por esta doble envoltura, impide la condensación del vapor que trabaja, durante su expansión.

E, biela que une la cabeza del émbolo, dirigida por la armadura de fundición de la máquina, con el manubrio que pone en acción el árbol del volante; F, plataforma que

sostiene el árbol de transmisión y unida con la armadura; G, armadura de fundición, tallada de modo que sirva de guía a la cabeza del émbolo; H, cabeza de biela y vástago de la bomba de aire del condensador; I, cabeza de biela y vástago de la bomba de alimentación que manda a la caldera agua caliente tomada al salir del condensador; K, excéntrica que pone en movimiento, por medio de la biela *l* y del brazo *m*, la plataforma *p* que gobierna la distribución; L, balancín unido con el búculo del émbolo por una biela y articulado en torno del eje X. Este balancín transmite el movimiento a la bomba de aire y a la de alimentación; M, regulador de fuerza centrífuga; N, volante; O, condensador; P, vaso donde el vapor que llega del cilindro encuentra el agua fría inyectada bajo forma de lluvia; T, tubos que ponen en comunicación al depósito B con el condensador.

Máquinas marinas. — Las máquinas llamadas *marinas* son las más potentes que se construyen. La potencia total de las máquinas de un vapor moderno, pasa de 50 000 caballos de vapor. Todas ellas son de expansión múltiple.

353. *Máquinas locomotoras.* — Las máquinas llamadas *locomotoras* son máquinas de vapor aplicadas al transporte de los viajeros y mercancías en las vías férreas.

En general, las locomotoras están constituidas por una armadura resistente, de palastro de acero, encima de la cual se coloca la caldera, y que está sostenida, mediante muelles, por un número más o menos grande de ejes según el peso de la máquina y el servicio a que se la destina.

Locomotoras de gran velocidad. — Las modernas (fig. 349) tienen dos o tres pares de *ruedas motrices*, reunidas todas por una *biela de acoplamiento*, que a su vez está articulada a los manubrios. A esta biela se articula la que está unida al vástago del émbolo. El diámetro de las ruedas varía de 1 m. 90 a 2 m. 10. La potencia de estas máquinas llega a 1 800 y aun a 2 000 caballos*; el esfuerzo de tracción que ejercen es por término medio de 10 000 kg. y aun de 14 000 kg. De modo que realizan fácilmente la velocidad máxima permitida, que es de 120 kilómetros por hora. En una vía de buenas condiciones y sin curva de radio inferior a 800 metros, podrían llegar sin riesgo a 140 o 150 kilómetros por hora.

Locomotoras de pequeña velocidad. — Estas máquinas, destinadas para los trenes de mercancías, comprenden 4 o 5 pares de ruedas motrices acopladas, de 1 m. 30 a 1 m. 60 de diámetro. Su velocidad es necesariamente reducida (40 km. por hora a lo sumo) pero en cambio arrastran trenes de 80 vagones, que suelen pesar hasta 1 200 toneladas.

Biseles y bogías. — Las locomotoras actuales son muy largas (de 13 a 16 metros). A fin de que puedan inscribirse en las curvas, su avántren, que comprende simples *ruedas de arrastre*, está articulado en un eje vertical; si no tiene más que un par de ruedas, se le denomina *bisel*, y *bogía* si tiene dos pares.

Ténder. — El ténder, enganchado detrás de la locomotora, contiene una provisión de agua (de 15 a 28 m³) y otra de carbón (5 toneladas); es arrastrado por tres pares de ruedas o por dos bogías. El agua del ténder va a la locomotora por un tubo flexible que llega a los inyectores Giffard.

Locomotoras compound. — El sistema compound se aplica a muchas locomotoras. Al aumentar la expansión, permite el empleo de una presión inicial de 16 kg. por cm², y procura una economía de carbón que llega hasta 15 por 100. Estas locomotoras tienen generalmente cuatro cilindros: dos de alta presión (los más pequeños) que se ven por fuera, y dos de baja presión interiormente. Para verificar un esfuerzo de tracción considerable, al arrancar por ejemplo, se puede enviar el vapor de alta presión a todos los cilindros, puesto que todos lo dejan escapar al aire libre; así es que estas locomotoras echan a andar rápidamente.

Recalentamiento en las locomotoras. — El recalentamiento del vapor (316) se ha aplicado a las locomotoras en estos últimos años, porque procura una economía considerable de carbón (16 por 100) y de agua (20 por 100), y por esta razón se va generalizando cada vez más este sistema.

La figura 349 representa una locomotora (modelo de 1912) que tiene a la vez este sistema y el compound; pero aun no se ha adoptado en general esta solución. También se

* La potencia de una locomotora depende sobre todo de la superficie del fogón Gm^2 , de la superficie de la caldera Cm^2 , de la presión $Pkg.$ por cm^2 que existe en la caldera. Se puede calcular aproximadamente esta potencia en caballos-vapor por una fórmula empírica:

$$W = k\sqrt{GCP}.$$

Para k se toma el valor 20, cuando las ruedas motrices tienen un diámetro igual o superior a 1 m. 50, y el valor 15 si son de diámetro inferior a 1 m. 50.

construyen máquinas de simple expansión, pero con cuatro cilindros iguales, como el modelo de los ferrocarriles del Estado.

354. **Turbinas de vapor.** — Las turbinas o turbomotores de vapor son

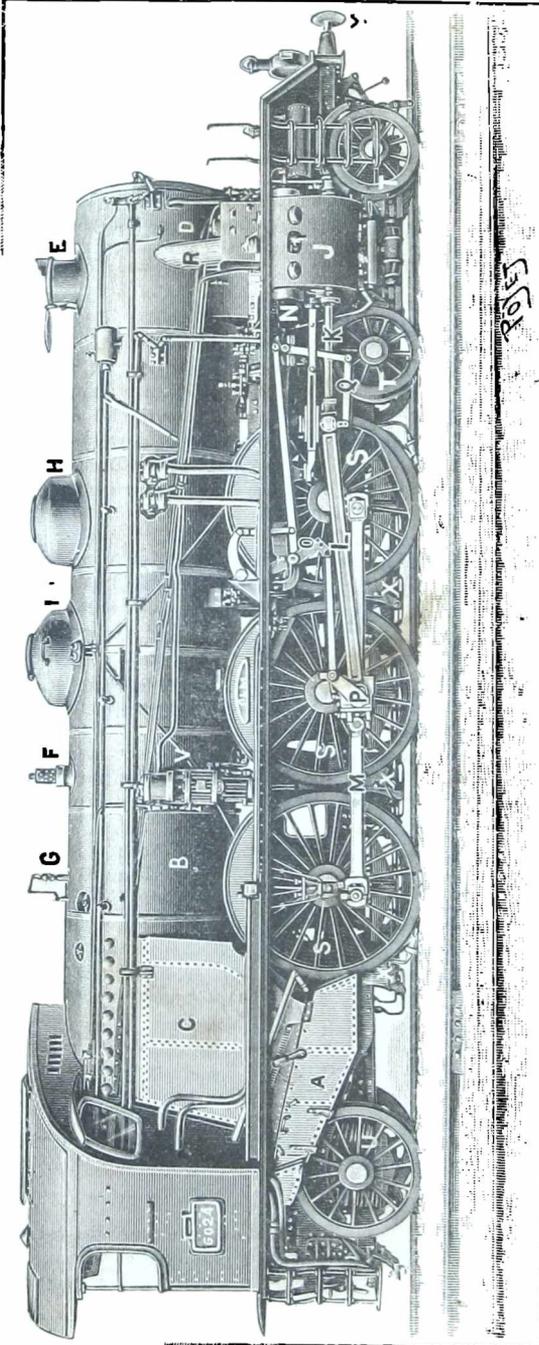


Fig. 349. — *Locomotora del ferrocarril de Paris-Lyon-Mediterráneo* : potencia, 1 800 caballos; longitud, 14 metros; altura, 4 m. 28; peso sin carga, 82 560 kg.; peso en marcha, 91 210 kg.

A fogón; B, cuerpo de la caldera; C, cámara de fuego; D, caja de humo; E, chimenea; F, válvula de seguridad; G, silbato; H, caja de vapor, donde está el registro que abre y cierra la comunicación con los cilindros; I, depósito de arena; J, cilindro alta presión; K, vástago del émbolo; L, cabeza de manubrio; M, biela de acoplamiento; N, vástago del cajón

(cilindrico); O, corredera de Stephenson; P, Q, registro de la distribución; R, tubo de salida del vapor por la chimenea; S, S, S, ruedas motoras; T, T, bogía; U, rueda de arrastre; V, compresor de aire para maniobrar los frenos de aire comprimido; X, X, X, calzas de los frenos; Y, tope.

máquinas que comunican directamente, por la acción del vapor, un movimiento de rotación a un árbol. Pueden ser de dos géneros : 1º tur-

binas de reacción, cuyo tipo es la turbina Parsons, y 2^o turbinas de acción, entre las cuales se encuentran las de Laval, Curtis y Zoelly.

Turbina Parsons. — Se funda en el principio siguiente: El vapor que procede de una caldera penetra, *bajo presión*, en VV (fig. 350), en un cilindro cuya superficie interior lleva coronas sucesivas de álabes de bronce. La figura 350 (II) presenta en FF' pequeños segmentos de dos coronas sucesivas, tales como se verían si el cilindro fuese transparente. En este cilindro hay un árbol AA que tiene dos coronas de paletas curvas MM' que alternan con las paletas fijas FF'. El vapor, dirigido por

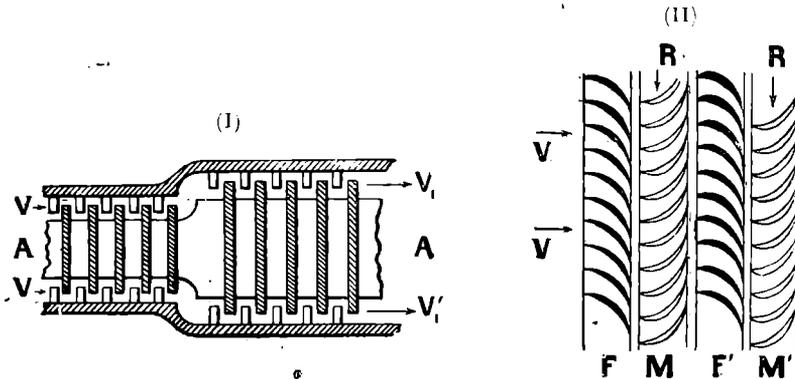


Fig. 350.

una corona F de paletas fijas, obra por su presión sobre las paletas móviles de la corona M, a la que obliga a dar vueltas en el sentido de la flecha R. Luego, lo vuelven a tomar las paletas fijas F' y lo dirigen a la corona móvil M', y así sucesivamente. Como el vapor, al expandirse, ocupa un volumen cada vez mayor, el cilindro se divide en secciones cuyos diámetros van creciendo.

Turbinas de acción. — En las turbinas de acción, el vapor procede de la caldera, expandido; pero con velocidad considerable. Es dirigido por toberas o álabes convenientemente dispuestas, sobre las paletas móviles, a los que hace dar vueltas, por su fuerza viva. La primera máquina de estas aplicada a la industria es la turbina de Laval.

La figura 351 representa una turbina de acción sistema Zoelly. Está dividida en dos partes. La primera, HP, recibe el vapor a alta presión que emana de la caldera, vapor que, después, va a parar a la sección BP, a baja presión. En la figura 351, la caja de la parte de baja presión está abierta, por lo cual se pueden distinguir las ruedas M, provistas de paletas móviles.

OBSERVACIÓN. — En las turbinas de reacción, como la expansión se completa en ruedas móviles, existe una diferencia de presión entre las dos caras de cada una de estas ruedas. Tal diferencia de presión produce un impulso longitudinal que debe contrarrestarse. Esto se consigue por órganos delicados llamados émbolos de equilibrio o compensadores. Además, en las turbinas de reacción no puede tolerarse más que un juego muy reducido (algunas décimas de milímetro), entre las partes

fijas y las partes móviles; de lo contrario, se originarían fugas, debidas a las diferencias de presión que acabamos de indicar.

Las turbinas de acción no ofrecen estos inconvenientes. Como el vapor se expandiona en conductos fijos, no hay diferencia alguna de presión entre las dos caras de la rueda. Por consiguiente, no se necesitan émbolos compensadores y puede tolerarse un juego de 2 a 3 mm. entre las partes fijas y las partes móviles. Por lo tanto, sea cual fuere

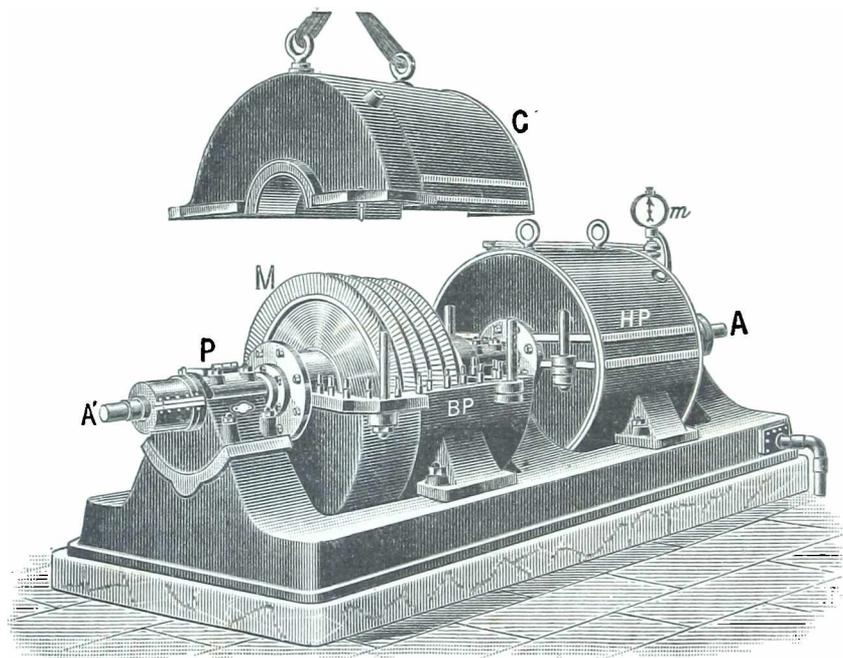


Fig. 351.

la influencia de las dilataciones y del desgaste de los soportes, las paletas móviles no pueden nunca alcanzar a las paletas fijas, al girar.

Ventajas de los turbomotores. — Aplicaciones. — Los turbomotores ofrecen grandes ventajas sobre las máquinas de émbolo. Su marcha es mucho más suave; puesto que no producen las trepidaciones que en las máquinas de émbolo causan los movimientos alternativos de sus distintas piezas. Por la misma razón, como sus diversos órganos no están sometidos a tan gran cansancio como los de las máquinas de émbolo, se les puede dar, a igualdad de potencia, dimensiones más pequeñas. Conviene particularmente para mover las dinamos. En este caso, el árbol de la dinamo se monta sencillamente en la prolongación del de la turbina. Las turbinas de vapor se emplean también con gran éxito en la propulsión de los barcos.

355. Motores de explosión. — *Principio.* — Coloquemos una mezcla de aire y de un gas combustible en un cuerpo de bomba, debajo de un émbolo, y, mediante una chispa eléctrica, prendamos fuego a la mezcla. De la elevación de temperatura que acompaña a la explosión, resulta una

presión considerable, y el émbolo es repelido; este movimiento puede, como en las máquinas de vapor, transmitirse a otros órganos.

En los motores fijos, se emplean principalmente, como gases combustibles, el gas del alumbrado ordinario, el gas pobre* y el vapor de petróleo.

Los motores de explosión tienen gran aplicación en los carruajes automóviles. Los motores de automóviles utilizan, generalmente, esencia de petróleo, que se recomienda por su volatilidad y por la considerable cantidad de calor que produce por su combustión. Generalmente se la reemplaza por benzol, y a veces por alcohol carburado con benzol.

356. Funcionamiento de los motores de explosión.

— Estos motores se fundan en el principio siguiente: El émbolo P (fig. 352) se mueve en un cilindro abierto por uno de sus extremos. Este cilindro posee dos aberturas S, S' que pueden cerrar dos válvulas, dirigidas por un mecanismo que expondremos en seguida. La abertura S' comunica con el exterior; es el *orificio de escape*. La abertura S comunica con el carburador por el tubo

A. Este órgano está destinado a proveer la mezcla de aire y de gas combustible. En el caso particular de los motores de automóviles, el aire exterior atraviesa al carburador antes de llegar a A y, en él, encuentra esencia de petróleo, a la que vaporiza y arrastra consigo.

Generalmente, el funcionamiento del motor se efectúa siguiendo un ciclo en cuatro tiempos.

1^{er} TIEMPO : *Aspiración*. — El émbolo está arriba de su carrera; al bajar, se abre la válvula S y es aspirado el aire, entrando por el orificio S, mezclado con gas combustible. Esta mezcla llena el cilindro.

2^o TIEMPO : *Compresión*. — El émbolo sube; la válvula S se cierra por

* El gas pobre se obtiene haciendo pasar por una columna de carbón incandescente una corriente de aire mezclado con vapor de agua. Contiene gran proporción de hidrógeno y óxido de carbono.

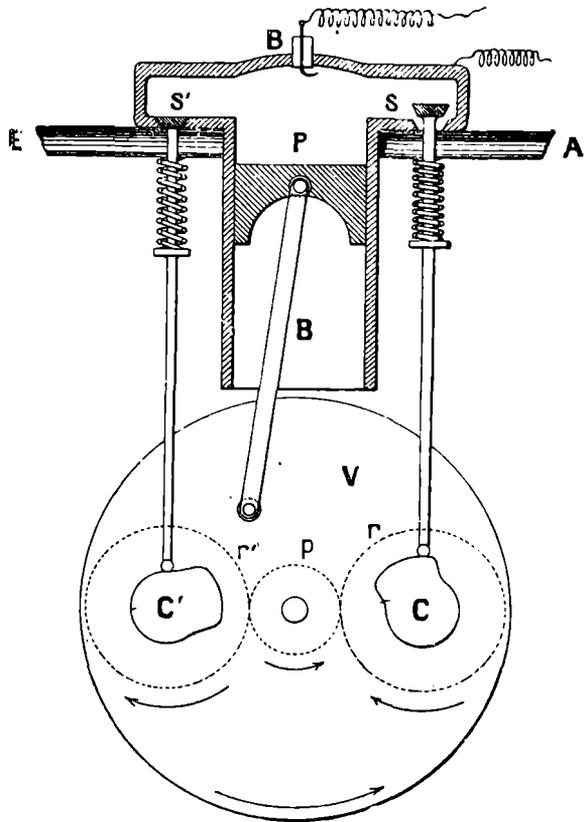


Fig. 352.

la acción de un resorte; la mezcla detonante se comprime en el espacio que el émbolo deja encima de él cuando está abajo. Este espacio se denomina *cámara de explosión*.

3^{er} TIEMPO : *Encendido y explosión*. — Al principiar este tiempo, el mecanismo del motor determina, en la cámara de explosión, la producción de una chispa eléctrica, que es la que prende fuego a la mezcla.

El émbolo vuelve a bajar, empujado por la alta presión producida por la explosión; los gases se dilatan.

4^o TIEMPO : *Escape*. — La válvula S' se abre, quedando cerrada S; el émbolo sube y los gases de la combustión salen por E.

Se ve, que, de estos cuatro tiempos, sólo hay uno durante el cual sufra el émbolo la fuerza motriz de los gases. De ahí resultan dos consecuencias. En primer lugar, la máquina no puede funcionar por sí misma: hay que comunicarle, a mano, un primer movimiento. Además, para regularizar el movimiento, se necesita un volante pesado V, movido por la biela B. En los motores de automóviles, este volante está compuesto de un doble disco de fundición.

Gobierno de las válvulas. — Según lo que precede, las válvulas S y S' deben abrirse una vez cada dos revoluciones de volante y durante media revolución de éste. Esto se consigue por medio de espigas *c* y *c'*, que giran con una velocidad dos veces menor que el mismo árbol del motor. Para lo cual, dichas espigas están montadas en los ejes de dos ruedas dentadas *r*, *r'* que engranan con un piñón *p* de diámetro dos veces menor, montado sobre el árbol. A veces no hay más que un árbol para las dos espigas, y en este caso la válvula de aspiración y la de escape están en el mismo lado del cilindro.

Enfriamiento del cilindro. — Para impedir que las explosiones producidas en el cilindro lo calienten en exceso, se le rodea de una circulación de agua. En los automóviles, esta agua se enfría por sí misma en los tubos provistos de aspas que presentan gran superficie al aire exterior. Estos constituyen el *radiador*.

Motores de varios cilindros. — En estos motores, funcionan simultáneamente 2, 4, 6, 8 cilindros idénticos. Tienen una marcha mucho más suave. En efecto, el motor de un solo cilindro resulta muy brusco: puesto que el gas no obra más que por explosiones sucesivas, las cuales producen trepidaciones. Estas son muy reducidas en los motores de varios cilindros que se hallan dispuestos de manera que las explosiones que se producen en los distintos cilindros se verifiquen sucesivamente.

Motores fijos. — *Motores Crossley*. — La figura 353 representa un motor de gas Crossley de 15 a 60 caballos, según sea la naturaleza del gas motor. A es el cilindro, B la biela, C el manubrio, D el volante, E el árbol, que gira a media velocidad. Este árbol gobierna por medio de un mecanismo de transmisión F, dos válvulas de admisión (para el gas y para el aire, que llegan separadamente); un regulador de fuerza centrífuga colocado en una caja G limita la ascensión de la válvula, cuando se acelera la velocidad. El mismo árbol E gobierna también la válvula de escape; H es la magneto de inflamación, I el tubo por donde llegan los gases y J el orificio de escape.

Con tales motores alimentados de gas pobre cuesta poco la fuerza motriz. Un motor Crossley, alimentado por un gasógeno Pierson, consume unos 450 gramos de carbón por caballo-hora. Hay que añadir que puede recuperarse el calor que se pierde en el motor.

Para eso se vaporiza el agua de enfriamiento, ya calentada en contacto del cilindro,

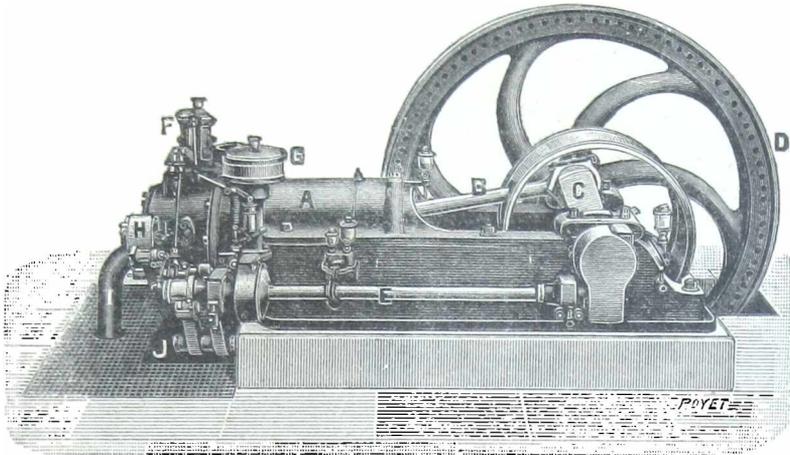


Fig. 353.

on un generador calentado por los gases de escape. El vapor obtenido de este modo puede ser empleado de otro modo en la fábrica que posea ese motor.

Motores de automóviles. — En los automóviles se emplean motores de diversas poten-

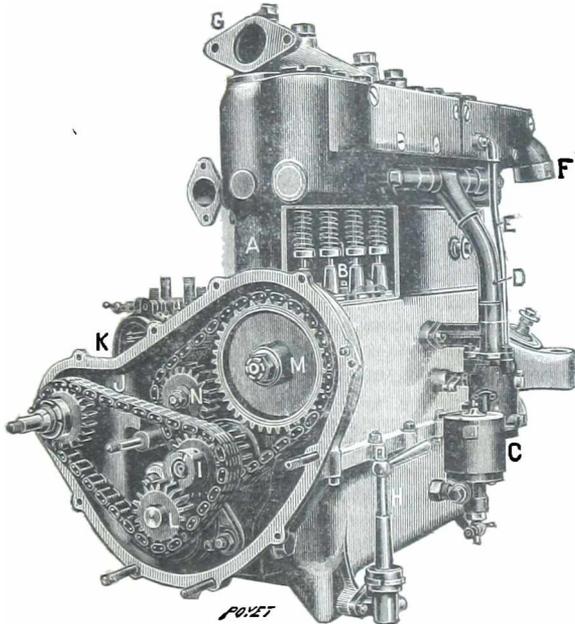


Fig. 351.

A, cilindros; B, vástagos de las válvulas de admisión y de escape; C, carburador; D, tubo por donde llega el gas; E, tubo por donde llega parte de los gases de la combustión para calentar el carburador; F, tubo de escape; G, salida de agua; H, depósito de aceite; I, árbol, en cuyo extremo lleva dos piñones que sostienen la cadena de gobierno de la magneto y la que gobierna el árbol de dientes; J, cadena de la magneto; K, magneto; L, piñón que maniobra la bomba de aceite, que sirve para tensar la cadena de la magneto; M, piñón del árbol de dientes; N, piñón independiente para estirar la cadena.

cias, desde 2 caballos próximamente en las motocicletas, hasta 100 caballos en los grandes carruajes.

La figura 354 representa un motor de Dion-Bouton de cuatro cilindros (modelo 1913, potencia 10 caballos-vapor). No tiene más que un árbol de dientes, por estar del mismo lado las cuatro válvulas de aspiración y las cuatro de escape.

La falta de ligereza es una de las dificultades de la aplicación de motores de petróleo a los carruajes automóbiles. En efecto, un motor de explosión no desarrolla toda su potencia sino cuando se mueve con la mayor velocidad posible; porque, a cada explosión, si la carburación es perfecta, el motor produce una cantidad determinada de trabajo. Por consiguiente, el motor será tanto más potente, cuanto más numerosas sean las explosiones, es decir, las revoluciones del motor en un tiempo dado. Sin embargo, la velocidad no puede crecer infinitamente. Se ha probado que la más conveniente es la de 1200 revoluciones de volante por minuto, o sean 600 explosiones en este espacio de tiempo.

Como, al contrario, el coche debe caminar a velocidades variables, entre el motor y el órgano receptor* del coche, hay que intercalar un mecanismo de cambio de velocidades que permita imprimir al vehículo la velocidad que se desee. Además, para parar, es necesario poder *desengranar* completamente el motor, y engranarlo para echarlo a andar.

Recordaremos, con este motivo, que un motor de explosión no se pone en marcha por sí mismo y que es menester lanzarlo. Esto se consigue, generalmente, por medio de un manubrio que gobierna al motor desengranado.

No entraremos en los detalles de los mecanismos empleados en el engranaje y los cambios de velocidad que se cuentan entre los órganos más delicados de los automóviles.

Perfeccionamientos de los primeros motores. — Carburadores. — En la mayoría de carburadores, la dosis de esencia destinada a una explosión va a parar a un recipiente que atraviesa el aire aspirado.

Cuando se regula para cierta velocidad un motor y se acelera su marcha, la aspiración de la esencia efectúase muy rápidamente y la mezcla se vuelve muy rica en esencia. Si, por el contrario, se disminuye la velocidad del motor, la esencia sale del recipiente muy lentamente, y la mezcla, demasiado pobre de esencia, carece de energía. Se ve, pues, que, para conservar *constante* la buena composición de la mezcla detonante (15 partes de aire por 1 de esencia), es menester agrandar la abertura de acceso del aire a medida que crece la velocidad. Como es sumamente difícil efectuar a mano esta regulación, se dispone el regulador de modo que la verifique *automáticamente*. Este mecanismo se ha aplicado en el carburador Ader. El comandante Krebs ha resuelto el mismo problema por medio de un mecanismo que no difiere, en realidad, del de Ader.

Diversos sistemas de encendido. — El encendido se efectúa a menudo por la chispa de un carrete de inducción cuya corriente primaria es debida a una pequeña batería de acumuladores.

Esta chispa se produce en la *bujía de encendido* B (fig. 352), entre un vástago aislado por un cilindro de porcelana y otro vástago que comunica con la masa metálica del motor. Para esto, uno de los extremos del hilo secundario del carrete está en comunicación permanente con la masa, y el otro, unido al vástago aislado de la bujía a cada dos revoluciones de volante, en el momento que se quiera, por medio de un mecanismo movido por el mismo motor.

Desde hace algunos años, para producir la chispa, se usan mucho pequeñas máquinas magneto-eléctricas llamadas *magnetos de encendido*, que generalmente dan corrientes de alta tensión, como la de los carretes.

Amortiguador o caja de escape. — El *amortiguador* es una especie de caja que recibe los gases encendidos, expulsados violentamente del cilindro, y que los permite expansionarse antes de salir a la atmósfera. De este modo, suprime ininterrumpida serie de detonaciones. También se introducen amortiguadores para la aspiración, ya que ésta es muy ruidosa en grandes velocidades.

En todos casos, el amortiguador disminuye la potencia del motor, porque aumenta la resistencia que se opone a los gases evacuados. Además, los amortiguadores pueden emplearse o suprimirse a capricho.

Motores ligeros. — Motores de aviación. — Teniendo en cuenta la propulsión de los aeroplanos, se han inventado diferentes modelos de motores de explosiones, que se distinguen por su mucha ligereza (1 kg. 500 a 2 kg. por caballo-vapor). Esta ligereza se ha

* Este órgano es el engranaje diferencial que permite al carruaje pasar por las curvas sin desaferrar. (Véase G. MANEUVRIER, *Tratado elemental de mecánica racional y aplicada.*)

obtenido disminuyendo el peso de sus diferentes piezas, y sobre todo por la supresión del radiador en muchos motores. Este resultado se ha obtenido perfectamente en los *motores rotatorios*, de los cuales el más omepleado es el *Gnome*. En estos motores el árbol de asiento está fijo, y los cilindros son los que giran al rededor de él, y su movimiento en el aire basta para enfriarlos. La hélice de los aeroplanos es solidaria de los cilindros.

La figura 355 representa un motor Gnome de 50 caballos-vapor. Consta de 7 cilindros y pesa 76 kg.

Motores sin válvulas. —

Las válvulas de los motores so deterioran por la acción de los gases calientes; por eso hay que guarnecerlas para evitar las fugas; su funcionamiento hace mucho ruido en las grandes velocidades, por causa de los fuertes muelles que las sujetan en su sitio; y por fin, al laminar los gases disminuyen el rendimiento de los motores. Así os que, desde hace unos años so construyen motores sin válvulas, en los cuales la admisión y salida de los gases se efectúan por distribuidores, algunos de los cuales funcionan como las correderas de las máquinas de vapor.

Motores de combustión interna, de Diesel. — Este

excelente motor funciona siguiendo un ciclo muy diferente del de los motores de explosión. En el primer tiempo aspira aire, y en el segundo lo comprime. En este aire, elevado a alta temperatura por la compresión, va el combustible impulsado durante una fracción del tercer tiempo; arde produciendo una presión considerable y luego los gases se dilatan durante el resto del tercer tiempo, y durante el cuarto los gases quemados son expulsados. El rendimiento del motor Diesel es mayor que el de los motores de explosión. Puedo quemar diversos combustibles y, especialmente, el *mazut* o residuo de la destilación de los petróleos, que cuesta muy poco. Este motor so emplea cada vez más en la navegación, sobre todo para la propulsión de los submarinos.

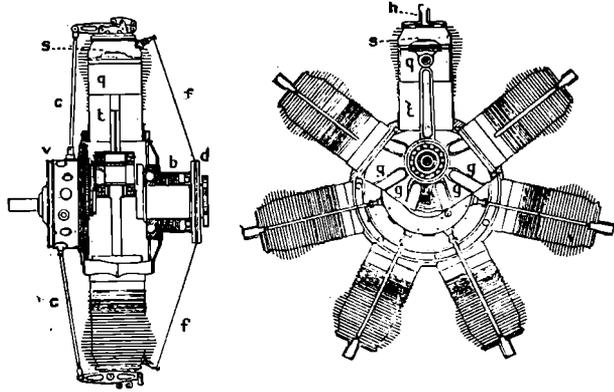


Fig. 355.

s, válvula automática de aspiración; h, válvula de escape gobernada; cc, vástagos que gobiernan las válvulas de escape; ff, alambres de inflamación; q, émbolo; t, biela maestra; g, bielas pequeñas articuladas en la biela maestra.

MEDIDA DEL TRABAJO EN LAS MÁQUINAS TÉRMICAS

357. — Evaluación del trabajo del fluido motor en una máquina térmica. — Ciclos. —

Consideremos el cilindro de una máquina de vapor. En un momento dado, sean AB (fig. 356) la posición del émbolo, de superficie S, y P la presión del vapor a la izquierda del émbolo. Esto se halla sometido a una fuerza $F = PS$. Y si se mueve de AB á A'B', en una cantidad $AA' = l$, sin que varíe la presión, el trabajo del vapor será $T = F \times l$ o $T = PSl = P\Delta v$, llamando Δv al aumento del volumen v del vapor.

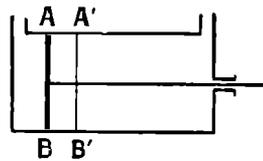


Fig. 356.

Por otra parte, llevemos a un diagrama, los volúmenes como abcisas y las presiones como ordenadas. Durante el intervalo de tiempo que se considera, la presión conserva un valor constante mM (fig. 357), por la cual el volumen varía de Om a Om' . En consecuencia, $\Delta v = mm'$ y el trabajo $T = p\Delta v$ está representado por el área del rectángulo $mMM'm'$. Y si el pistón se mueve de modo que el volumen del vapor varíe de Oa a Ob , sin cambio de presión, el trabajo del vapor está representado por la suma de las áreas de los rectángulos tales como $mMM'm'$, es decir por el área del rectángulo $aABb$. Lo que acabamos de exponer, puede decirse también

on caso en que el vapor trabaje á toda presión. Pero, si la presión del vapor, á partir de un volumen Ob , se suprime durante la expansión, del volumen Ob al volumen Oc , la presión del vapor baja según una ley indicada por la curva BC . Descompongamos la

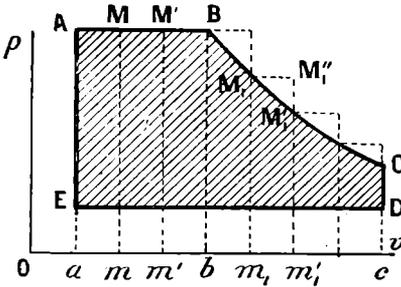


Fig. 357.

variación total del volumen bc en variaciones tales como m, m', m'' , muy pequeñas. El trabajo del vapor durante una de ellas m, m' , estaría representado por el área del rectángulo m, M, M', m' si la presión hubiera conservado el valor constante m, M . Pero si se descompone bc en una infinidad de variaciones de volumen bastante pequeñas para que, en cada una de ellas, pueda considerarse como constante la presión del vapor, la suma de las áreas de los pequeños rectángulos tales como m, M, M', m' se hace igual al área del trapecio curvilíneo $BCcb$ y representa exactamente el trabajo del vapor durante la expansión.

Supongamos que el compartimiento de la izquierda del cilindro se ponga, en el punto C , en comunicación con el condensador; la presión disminuye hasta el valor $p = cD$. Imaginemos que esta disminución se produzca bruscamente, lo cual no se realiza en las máquinas de vapor. Como el émbolo vuelve hacia atrás, la fuerza constante pS que el vapor ejerce en la cara izquierda efectúa un trabajo resistente representado por el área $cDEa$. Al extremo de la carrera del émbolo, en el momento en que el compartimiento de la izquierda se pone en comunicación con la caldera, la presión sube lentamente del valor p al valor P , de manera que el punto que

representa el volumen y la presión del vapor en el compartimiento de la izquierda del cilindro vuelve al punto A , después de haber descrito lo que llamaremos un ciclo cerrado $ABCDE$. Según lo que antecede, se ve que el trabajo del vapor durante este ciclo es igual al área $aABc$ disminuida en el área $aEDc$, es decir, al área del mismo ciclo $ABCDE$.

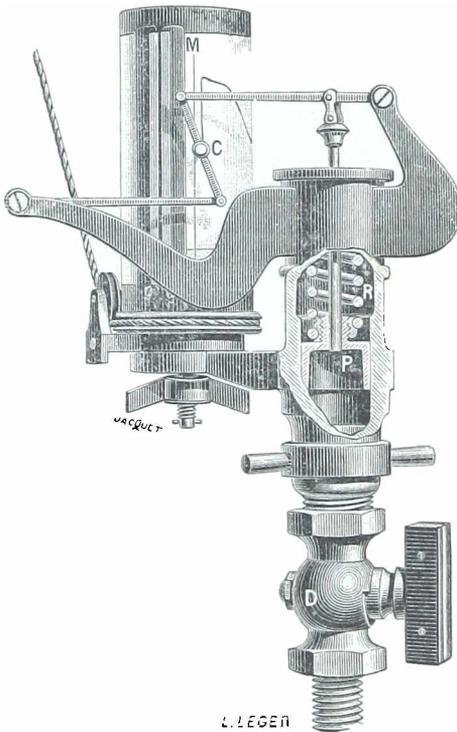


Fig. 358.

émbolo está articulado en una de las ramas de un paralelogramo que tiene por función dirigir el lápiz C en línea recta, a la vez que amplifica unas 5 veces los movimientos del émbolo. Delante de la punta del lápiz C , se dispone un cilindro M donde se enrolla

OBSERVACIONES. — 1ª. En la máquina de vapor, se debe considerar también el trabajo del vapor en la cara de la derecha del émbolo. Está representado por un ciclo semejante al anterior, con la sola diferencia que mientras a un lado del émbolo el trabajo del vapor es motor, al otro lado es resistente.

2ª. El ciclo representado en la figura 357 es teórico. El de las máquinas verdaderas es algo diferente (fig. 259).

358. — Indicadores. — Ciclos de las máquinas de vapor y de los motores de explosiones. — Los aparatos llamados indicadores se emplean en las máquinas térmicas para medir el trabajo de su fluido motor durante un ciclo completo. El primero de estos aparatos fué inventado por Watt.

El indicador usado actualmente tiene escasa analogía con el que ideó Watt. Compónese principalmente de un cilindro de bronce en que puede moverse un émbolo P (fig. 358), fijo en un muelle R . El aparato se adapta al fondo del cilindro de la máquina que se trata de ensayar y comunica con el interior por medio de la llave D . El vástago del

una hoja de papel. Una cuerdecilla, arrollada en la parte baja del cilindro, va a unirse con la cabeza del émbolo de la máquina por medio de enlaces apropiados de poleas. Un muelle interior al cilindro tiende a ponerlo siempre en la posición que indica la figura: de ahí resulta que el movimiento del émbolo motor es transmitido al cilindro y lo imprime un movimiento alternado igual a $2/3$ de circunferencia próximamente.

Cerrada la llave D y una vez en movimiento la máquina que se trata de ensayar, el lápiz C marca sobre el cilindro un rasgo horizontal que representa la línea de presión atmosférica. Si, entonces, se abre la llave D, la presión se transmite al émbolo del indicador, que comprime el muelle proporcionalmente a esta presión, moviéndose al mismo tiempo el lápiz sobre el cilindro.

Como los movimientos del lápiz C, proporcionales a la presión del fluido motor, son paralelos a una generatriz del cilindro M, mientras que los movimientos del émbolo de la máquina producen un movimiento de rotación cuyo sentido es perpendicular, resulta que la punta del lápiz trazará sobre la hoja de papel una curva cerrada cuyas abscisas son proporcionales a los volúmenes del vapor, y las ordenadas, a las presiones.

Un punto cualquiera de la curva trazada por el indicador representa al mismo tiempo la posición del émbolo dentro del cilindro y la presión del fluido que actuaba sobre él en un momento dado. Luego el área circunscrita por la curva (fig. 359) es proporcional al trabajo desarrollado sobre la cara del émbolo durante una revolución de la máquina.

Puede calcularse la superficie del diagrama, sea valiéndose de un instrumento llamado *planímetro*, sea por un método geométrico. En seguida se evalúa este trabajo en kilo-

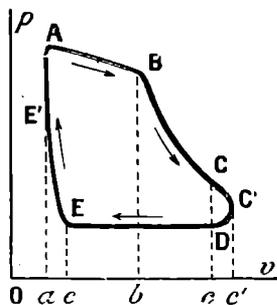


Fig. 359.

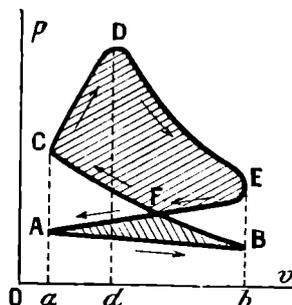


Fig. 360.

grametros si se conoce, en kilogramos, por medio del manómetro de la caldera, la presión máxima y al mismo tiempo la superficie y la carrera del émbolo.

La figura 359 representa un ciclo tal como le ha trazado el indicador.

Se ve: 1° que durante la admisión AB la presión disminuye un poco a causa del movimiento rápido del pistón; 2° después de la expansión, representada por BC, la presión ha disminuido bruscamente antes que el pistón haya llegado al fin, por causa del *avance del escape*; 3° del mismo modo, la presión comienza a subir según EE' antes que termine el movimiento inverso, por causa del *avance de la admisión*.

OBSERVACIONES. — 1° Conviene hacer un diagrama de cada lado del cilindro. La potencia de la máquina, en kilográmetros por segundo, es igual a la suma de los trabajos representados por los dos ciclos, multiplicada por el número de ciclos efectuados por segundo, que es igual a dos veces el número de vueltas del árbol durante el mismo tiempo. El número calculado de este modo, dividido por 75, da la potencia en caballos-vapor.

2° Trabajo indicado. — Llámase *trabajo indicado* el resultado obtenido por el cálculo de los diagramas. Ahora bien, es evidente que la potencia *utilizable* de la máquina es inferior al trabajo indicado. El frotamiento de los órganos, el trabajo necesario para hacer funcionar los condensadores, cajones de distribución, bombas etc., es bastante considerable y, por lo demás, varía mucho según el tipo de las máquinas. Con frecuencia pasa de 10 0/0 aun en las buenas.

Ciclo de un motor de explosión. — El ciclo de un motor de explosión no puede ser trazado por un indicador ordinario; porque este aparato tiene una inercia muy grande para registrar las variaciones muy rápidas de la presión en el cilindro. Entonces se emplean otros aparatos, los *monógrafos*, cuya descripción no haremos. El ciclo obtenido se descompone en cuatro partes.

1°. *Admisión*: El volumen varía del volumen Oa (fig. 360) de la cámara de explosión al volumen total Ob del cilindro; y la presión, al principio, igual a la presión atmosférica, disminuye un poco.

2ª. *Compresión* : El volumen varia de Ob a Oa , en tanto que la presión aumenta de bB a aC .

3ª. *Explosión y expansión* : La explosión se produce al empezar el tercer tiempo. Resulta, de ahí, un aumento brusco de presión de aC a dD , mientras que, a causa del movimiento del émbolo, el volumen aumenta algo. Durante la expansión que sigue, como el volumen aumenta de Od a Ob , la presión baja de dD a bE .

4ª. *Escape* : Mientras el volumen vuelve del valor Ob al valor Oa , la presión, algo superior a la presión atmosférica, vuelve a esta última.

Los trabajos efectuados en los cuatro tiempos son los siguientes : 1º trabajo motor durante el primer tiempo (el gas interior ejerce una presión en el sentido del movimiento) medido por el área $aABb$; 2º trabajo resistente durante el segundo tiempo (el gas interior ejerce una presión en sentido inverso del movimiento) medido por el área $bEAa$; trabajo motor durante el tercer tiempo (área $aCDEb$); trabajo resistente durante el cuarto tiempo (área $bEAa$). Se ve que si se añaden las áreas correspondientes a los trabajos motores, y que si se resta la suma de las áreas correspondientes a los trabajos resistentes se tiene área $CDEF$ — área ABF ; luego ésta es la diferencia que mide el trabajo de los gases en el cilindro.

359. *Medida de la potencia utilizable. — Freno de Prony. —* Sirvo para medir el trabajo realmento disponible en un árbol de un motor cualquiera. Sea A (fig. 361) el árbol

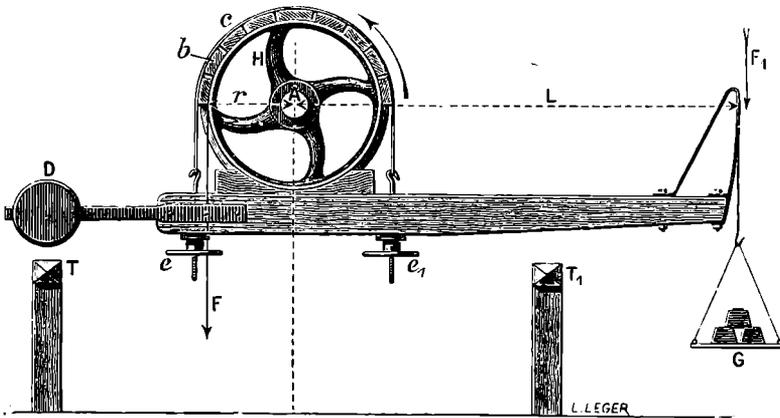


Fig. 361.

de asiento de un motor cualquiera cuya potencia se quiere calcular. En este árbol se fija una polea H , perfectamente por su centro, y en torno de la cual se dispone una especie de collar c , que está provisto interiormente de cuñas de madera b y sostiene un brazo de palanca terminado en un arco de círculo concéntrico al eje de la polea. De ahí resulta que la longitud eficaz de la palanca es L . Las tuercas e, e_1 , permiten apretar más o menos el collar en torno de la polea H . Un contrapeso D , opuesto a la palanca, la equilibra perfectamente, así como el platillo G suspendido del garfio, de tal manera que, estando en reposo el árbol A , puede la palanca colocarse entre los dos topes T y T_1 , que limitan sus movimientos.

Puesta en marcha la máquina en el sentido de la flecha, se comprende inmediatamente que la palanca va a ser arrastrada contra el tope T si el collar c está apretado en torno de la polea. Arreglando convenientemente la presión de las tuercas e, e_1 , — lo que disminuye o aumenta naturalmente el trabajo absorbido por el freno, — se llega a conservar al motor su velocidad de régimen, o, de otra modo, la velocidad con que debe funcionar en servicio normal. Entonces, se vuelve la palanca a su posición primitiva, media entre los dos topes, valiéndose de pesos conocidos que se colocan en el platillo G . Al llegar este momento, el esfuerzo del motor queda por tanto compensado exactamente por la acción del peso en la extremidad de la palanca.

Podemos admitir que el frotamiento de la polea en el freno actúa como una fuerza F , tangente a la polea en la extremidad del radio r ; estando la palanca en equilibrio, el momento de la fuerza F es igual al momento de la fuerza P . Se tiene pues

$$Fr = PL.$$

El trabajo de la fuerza F , para una vuelta del árbol, es

$$F \times 2\pi r = 2\pi PL,$$

Por otra parte, se mide el número n de vueltas del árbol por segundo. La potencia de la máquina es pues

$$W = 2\pi PLn$$

Si expresamos P en kilogramos y t en metros, se expresa esta potencia en kilográmetros por segundo. Se la obtiene en caballos-vapor dividiéndola por 75.

CAPÍTULO XIV

NOCIONES ELEMENTALES DE TERMODINÁMICA

360. **Calor desprendido o absorbido por las acciones mecánicas.** — En muchos experimentos se puede observar la desaparición de trabajo mecánico sin que haya aumento correspondiente de energía cinética o potencial: pero *entonces aparece calor*. Por el contrario, en las máquinas térmicas se puede observar la desaparición de calor: pero entonces hay *creación de trabajo mecánico o de fuerza viva*. He aquí algunos ejemplos del primer caso.

I. *Frotamiento o roce.* — *El frotamiento de dos cuerpos uno contra otro produce calor.* — Esta proposición resulta de los experimentos diarios. Un cuerpo sólido, por ejemplo, un trozo de metal, frotado fuertemente contra una mesa de madera, se calienta hasta el punto de quemar. Por eso, obedeciendo al mismo fenómeno, se enciende el fósforo de las cerillas.

He aquí algunos experimentos clásicos:

1°. Davy fundió dos pedazos de hielo frotándolos uno contra otro, en una atmósfera cuya temperatura estaba por debajo de cero.

2°. Rumford efectuó, en 1790, un memorable experimento: pues descubrió que perforando debajo del agua una masa de bronce para obtener 250 gr. de limaduras, se desarrollaba por frotamiento calor suficiente para elevar 25 kg. de agua desde 0° a 100°, o sean 2500 calorías.

3°. Beaumont y Mayer construyeron en París, el año 1855, un aparato donde calentaban en pocas horas 400 litros de agua de 10° a 130°: era un cono de palo cubierto de cáñamo que frotaba, dando 400 vueltas por minuto, con otro cono de cobre hueco, fijo y sumergido en el agua de una caldera herméticamente cerrada.

II. *Choque y percusión.* — Dejando caer una bola de marfil sobre un cuerpo duro, rebota en virtud de la elasticidad, pero no se calienta; pero si la bola es de plomo, que no es elástico y que no rebota, se calienta sensiblemente como si su fuerza viva quedara transformada en calor. Análogamente, cuando se dispara una bala contra una placa de hierro que la detiene bruscamente, el plomo se aplasta y, al mismo tiempo, se calienta hasta un grado que puede llegar al punto de fusión.

Al ensayar las placas destinadas al blindado de los buques de guerra y disparar contra ellas el cañón, se ve que las balas alcanzan brusca-

mente la temperatura roja en el momento de ser detenidas por las planchas.

361. Principio de la equivalencia del calor y del trabajo. — En todos estos experimentos, se ha observado que siempre que los diferentes cuerpos se han encontrado, al fin del experimento, en el mismo estado físico o químico que al principio, hay *equivalencia absoluta* entre el trabajo y el calor. O por decirlo de otro modo; *a toda cantidad de calor perdido corresponde una cantidad proporcional de trabajo efectuado, y reciprocamente, a todo trabajo consumido corresponde una cantidad proporcional de calor naciente.* Este hecho constante constituye el *principio de la equivalencia del calor y del trabajo.*

Este principio, como todos los principios experimentales, no se ha podido demostrar más que en casos particulares; pero la generalidad queda demostrada por la prueba experimental de todas las consecuencias que de ahí se han deducido.

Por consiguiente, el calor se nos presenta como una forma nueva de la energía. Si se atribuye el calor a un movimiento vibratorio de la materia, resulta una magnitud de la misma naturaleza que la fuerza viva, y el lazo que le une al trabajo es una consecuencia necesaria del principio de las fuerzas vivas.

362. Equivalente mecánico de la caloría. — Se da el nombre de *equivalente mecánico de la caloría* al trabajo que corresponde a la aparición o desaparición de la unidad de calor. Para determinar este coeficiente se han empleado diversos métodos directos, cuyo tipo es el experimento de Joule, hecho en 1843. También se le ha deducido de experimentos indirectos para demostrar que su valor es independiente de las circunstancias de transformación del trabajo en calor. El término medio de gran número de medidas ha dado 426 kilográmetros para el equivalente mecánico de la gran caloría.

Equivalente mecánico C. G. S. — En el sistema C. G. S., la unidad de calor es la pequeña caloría, y la unidad de trabajo el ergo. Ahora bien, 1 gran caloría (o 1 000 pequeñas calorías) equivale a 426 kilográmetros o $426 \times 1\,000 \times 981 \times 100$ ergos, la *pequeña caloría equivale pues a* $426 \times 981 \times 100$ ergos o $4,18 \times 10^7$ ergos, sea 4,18 julios. Inversamente 1 julio equivale a $\frac{1}{4,18} = 0,24$ caloría.

363. Métodos directos. Experimentos de Joule. — I. Joule empezó por servirse de un calorímetro de agua C en el cual giraba un árbol vertical provisto de paletas (fig. 362). La rotación se efectuaba por medio de dos cordones arrollados en el mismo sentido sobre un torno adaptado al árbol de las paletas, de tal modo que al bajar los dos pesos hacían girar el torno en el mismo sentido (fig. 362, I). Los cordones iban a pasar por dos poleas arrastradas por dos pesos iguales P.

Representando por P la suma de las masas P, P, medidas en kilogramos, por h la altura de descenso calculada en metros, el trabajo producido durante el descenso era Ph kilográmetros. Como este trabajo era destruido por la resistencia que el agua oponía al movimiento

de las paletas, se transformaba en calor y calentaba el líquido un número de gradss θ , medidos por el termómetro. Conociendo θ , la masa μ del calorímetro reducido al agua y la masa m de ésta, se obtenía por la fórmula $(\mu + m) \theta$ la cantidad total de calor, equivalente al trabajo total, y por el cociente $J = \frac{Ph}{(m + \mu)\theta}$ el trabajo correspondiente a una sola caloría, es decir, el *equivalente mecánico de la caloría*.

Correcciones. — Sin embargo, en este experimento no era destruido

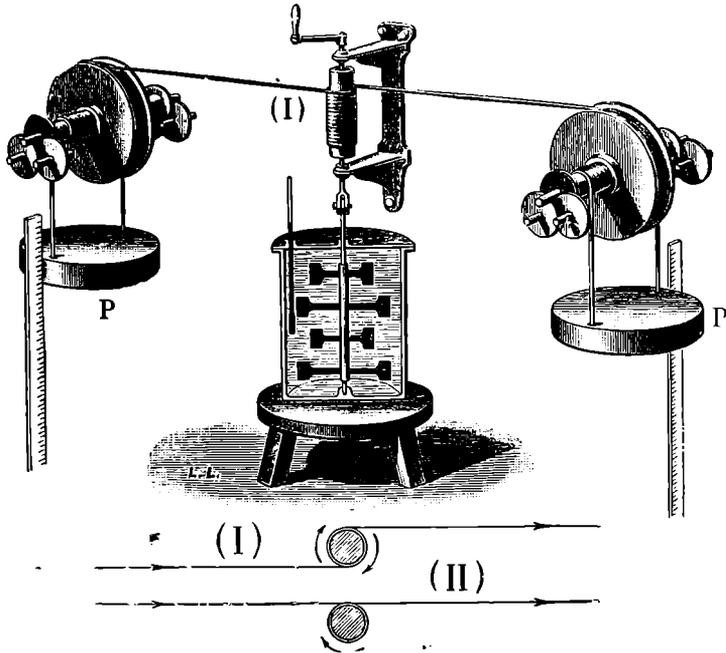


Fig. 362.

por el frotamiento del agua todo el trabajo de los pesos; una parte se empleaba en vencer la resistencias del mecanismo, o era anulada por el choque de los pesos contra el suelo al fin de su descenso; evaluábanse luego todas estas pérdidas accesorias, y se deducían del valor total*.

OBSERVACIÓN. — Nótese que; en este experimento, se cumplen bien las condiciones de equivalencia. Cuando todo vuelve a su primitivo estado inicial, el calorímetro recibe el trabajo Ph y, al enfriarse, devuelve la cantidad de calor $(m + \mu) \theta$.

II. Joule dedujo también ese equivalente mecánico, ya de la compresión del aire en un calorímetro de agua, ya de la cantidad de calor

* Para efectuar esta evaluación, enrollábanse los cordones de modo que la caída de uno de los pesos produjera el ascenso del otro (fig. 362, II). Luego, se separaba el torno del eje de las paletas y se cargaba uno de los pesos, con una pequeña masa de p kg., determinada por tanteos, de manera que los pesos llegasen al suelo con la misma velocidad v que en el experimento anterior. El trabajo ph kgm, debido a la caída de p es equivalente al trabajo de los frotamientos exteriores al calorímetro, aumentado en la fuerza viva total de los pesos $P + p$. Despreciábase la fuerza viva de p , que era muy pequeña al lado de la de P , y del trabajo de Ph , se deducía ph .

emitida por el frotamiento de dos cuerpos sólidos uno contra otro en un calorímetro *de mercurio*.

Otras medidas directas. — Hirn, Favre y otros muchos físicos franceses han calculado igualmente el equivalente mecánico de la caloría. La media aritmética de estos distintos experimentos es 426 kilográmetros.

364. Transformación inversa del calor en trabajo. — **Experimentos de Hirn.** — Los motores térmicos, cuyo tipo es la máquina de vapor, son máquinas en las que el calor se transforma en trabajo. Hirn es el primero que ha probado que cuando una máquina de vapor funciona produciendo trabajo, la cantidad de calor que devuelve el vapor al condensador, añadiendo las pérdidas por radiación o conductibilidad, es más pequeña que la que el fogón ha suministrado para producir la vaporización. Luego cuando se produce así trabajo mecánico, hay una pérdida correspondiente de calor.

En una máquina en estado de régimen permanente, Hirn ha medido la cantidad de calor destruida en un tiempo dado y la cantidad de trabajo suministrado en ese mismo tiempo. La razón entre estas dos cantidades ha sido casi constante y próxima a 426. Por otra parte, estos experimentos estaban sujetos a errores importantes, el primero de los cuales era la pérdida de calor que experimenta la máquina por radiación.

365. Métodos indirectos. — 1º *Experimento de Joule.* — El cálculo siguiente del equivalente mecánico del calor se funda en un antiguo experimento de Gay-Lussac, repetido después por Joule.

Se introducen en el agua de un calorímetro dos vasos que se comunican por un tubo de llave; uno contiene un gas comprimido y el otro está vacío. Cuando se abre la llave no se observa ninguna variación de temperatura del agua del calorímetro. Por consiguiente, no hay ninguna variación de temperatura cuando una masa de gas se dilata en el vacío, es decir, sin efectuar trabajo mecánico exterior.

Hay que advertir que esta conclusión no es perfectamente rigurosa. En efecto, Joule y lord Kelvin han probado con experimentos más precisos que cuando un gas se dilata así, hay siempre una variación de temperatura, que es muy débil, es verdad, y tanto más cuanto más se acerca el gas a lo que hemos llamado *estado gaseoso perfecto* *.

2º *Cálculo del equivalente mecánico de la caloría.* — Supongamos una masa de aire de un gramo, colocada, a la temperatura 0º y a la presión atmosférica normal, en un cilindro, debajo de un tabique AB (fig. 363).

* En todos los gases, menos el hidrógeno, la temperatura baja cuando se expande el gas. Este fenómeno se aplica a la licuefacción del aire en el aparato Linde. En el hidrógeno, en las condiciones ordinarias de temperatura, la expansión en el vacío aumenta la temperatura; pero, a temperaturas muy bajas, el hidrógeno es como los demás gases. Esto es lo que permite aplicar a su licuefacción el principio del aparato de Linde; para lo cual, se somete el hidrógeno a expansión, después de enfriarlo con aire líquido.

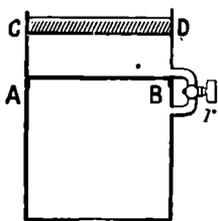


Fig. 363.

Por arriba, prolóngase el cilindro por un compartimiento ABCD vacío y cuyo volumen iguala a la dilatación Δv que sufre un gramo de aire al pasar de 0° a 1° , a presión constante. En CD, hay un émbolo de peso despreciable, que sufre la presión atmosférica, fijo, por un procedimiento cualquiera. Los dos compartimientos pueden comunicar por un tubo de volumen despreciable, provisto de una llave que, al principio, supondremos cerrada.

Hagamos sufrir a la masa de aire las transformaciones siguientes :

1º Calientase el aire, a volumen constante, de 0° a 1° . La cantidad de calor proporcionada al gas es c , representando esta letra el calor específico a volumen constante.

2º Ábrese la llave r ; el aire, cuya presión ha aumentado en la operación precedente, se expansiona. En esta transformación no interviene el calor, en virtud del experimento anterior de Joule. Tampoco se ha comunicado trabajo al gas ni lo ha proporcionado éste; puesto que la expansión se efectúa en el vacío. Además, en virtud del valor de Δv , el aire recobra su presión inicial.

3º Déjase en libertad el émbolo y se disminuye en 1° la temperatura del gas. La presión atmosférica p_0 actúa en la superficie S del émbolo, que desciende una cantidad h . El gas recibe, pues, un trabajo $\bar{c} = p_0 Sh$ o $p_0 \Delta v$. Al mismo tiempo, el gas rinde una cantidad de calor C , representando por esta letra el calor específico a presión constante.

Se ve que esta serie de transformaciones ha vuelto al gas a su primitivo estado. Por otra parte, aquél recibe un trabajo $\bar{c} = p\Delta v$ y devuelve una cantidad de calor $Q = C - c$.

El cociente $\frac{\bar{c}}{Q}$ mide el equivalente mecánico de la caloría J. Se tiene pues : $J = \frac{p\Delta v}{C - c}$.

Cálculo de \bar{c} . -- Sean v el volumen del gas a 1° , y v_0 , su volumen a 0° .

Tendremos :

$$v = v_0(1 + \alpha). \quad \text{De donde} \quad v - v_0 = \Delta v = v_0\alpha.$$

Por otra parte :

$$v_0 = \frac{1}{0,001293} \quad \text{y} \quad \alpha = \frac{1}{273}.$$

Finalmente, p_0 , presión atmosférica normal, es igual, en unidades cegesimales, a $76 \times 13,596 \times 981$. Luego :

$$\bar{c} = 76 \times 13,596 \times 981 \times \frac{1}{273 \times 0,001293} \text{ ergos.}$$

Por otra parte, tenemos :

$$C = 0,2347 \quad \text{y} \quad c = 0,1687.$$

De donde resulta :

$$Q = 4,18 \times 10^7.$$

366. **Energía calorífica.** — Según los experimentos precedentes, se ve que, si llamamos J al equivalente mecánico de la caloría, una cantidad de calor Q puede transformarse en una cantidad de trabajo JQ .

Esta cantidad JQ se denomina *energía calorífica* correspondiente a la cantidad de calor Q .

Ciclos cerrados y no cerrados. — *Energía interna.* — Cuando un cuerpo o un sistema de cuerpos sufre una serie de transformaciones que le conducen a su estado inicial, se dice que describe un *ciclo cerrado*. Supongamos que no ha efectuado más que cambios de calor y trabajo con el exterior. Designemos por Q el calor que ha recibido*, y por \mathcal{C} el trabajo que él mismo ha desprendido al exterior**.

Según lo que acabamos de indicar, tenemos :

$$\frac{\mathcal{C}}{Q} = J, \quad \text{de donde} \quad JQ - \mathcal{C} = 0.$$

Pero, si el sistema no ha vuelto a su primitivo estado, $\frac{\mathcal{C}}{Q}$ no es forzosamente igual a J . Luego $JQ - \mathcal{C}$ no es forzosamente nulo.

La magnitud

$$\Delta E = JQ - \mathcal{C}$$

se denomina *variación de la energía interna del sistema*.

En efecto, el calor Q que recibe equivale a una energía JQ , y, si, al mismo tiempo, el sistema desarrolla un trabajo \mathcal{C} , es lo mismo que si realmente hubiera recibido un trabajo $JQ - \mathcal{C}$ ***.

Teorema. — Cuando un cuerpo o un sistema de cuerpos pasa de un estado A a un estado B , la variación de su energía depende únicamente del estado inicial A y del estado final B , y no del ciclo de operaciones efectuadas.

Supongamos, en efecto, que se pueda pasar de A a B por un primer ciclo 1 en que la cantidad de calor, el trabajo desarrollado y la variación de energía sean respectivamente Q , \mathcal{C} , $\Delta E = JQ - \mathcal{C}$, y por un segundo ciclo caracterizado por Q' , \mathcal{C}' , $\Delta E' = JQ' - \mathcal{C}'$. Pasemos de A a B por el ciclo 1; volvamos, luego, al estado A , siguiendo, en sentido inverso, las operaciones del ciclo 2. En este último pasaje, las cantidades de calor y de trabajo que intervienen son evidentemente iguales en valor absoluto, pero, de signos contrarios, a las mismas cantidades, cuando se sigue el ciclo 2 en sentido directo. La variación de energía será, pues, $-\Delta E'$. Pero, como al llevar el sistema al estado inicial, la variación total de energía, que está representada por $\Delta E - \Delta E'$, debe ser nula, tendremos $\Delta E = \Delta E'$, que es lo que se quería demostrar.

Ejemplo de variación de energía interna en un ciclo no cerrado. — Supongamos que en un cilindro hay una masa de agua de 1 gr. a 100° y coronada por un émbolo. Se abre el cilindro y la presión atmosférica actúa en su cara superior. Conservemos la temperatura fija a 100° y levantemos lentamente el émbolo hasta que el agua se vaporice por completo. Sabemos que el volumen del agua que era, poco más o menos, 1 cm³. se convierte, en estado de vapor, en 1690 cm³. Luego ha aumentado en 1689 cm³. Por consiguiente, el vapor efectúa, contra la presión atmosférica, un trabajo :

$$76 \times 13,596 \times 981 \times 1690 \text{ ergamias.}$$

* Q será positiva si el sistema ha recibido realmente calor, y negativa si lo ha proporcionado.

** \mathcal{C} será positiva si el sistema ha proporcionado trabajo; negativa si lo ha recibido.

*** La expresión $JQ - \mathcal{C}$ da la variación de la energía en magnitud y signo al mismo tiempo.

Pero, del foco que mantiene constante la temperatura, recibe una cantidad de calor $Q = 537$ calorías. Por lo tanto, la energía interna varía

$$537 \times 4,18 \times 10^7 - 76 \times 13,596 \times 981 \times 1690 = 207 \times 10^8 \text{ ergamias.}$$

Tal es el aumento de la energía interna del gramo de agua en su vaporización a 100° .

367. Energía interna de una masa de gas. — Ley de Joule. — *La energía interna de una masa de gas perfecto es independiente de su volumen y sólo depende de su temperatura.*

En efecto, supongamos que se tiene una masa m de gas, a temperatura t , en un volumen v . Pongámosla en comunicación con un espacio vacío, y se expansionará. Sabemos (365), que aquí no intervienen para nada el calor ni el trabajo. Por consiguiente, podemos aumentar el volumen del gas sin variar su temperatura, y la energía interna permanecerá constante.

Pero, si se aumenta la temperatura del gas, a volumen constante, por ejemplo, comunicándole cierta cantidad de calor, se aumenta también su energía interna.

Así si la temperatura varía de t a t' , la cantidad de calor que habrá de suministrarse o suprimir al gas nos la da, en magnitud y signo, la igualdad $Q = mc (t' - t)$.

Como el volumen permanece constante, el trabajo exterior es nulo; luego la variación de energía se reduce a JQ , es decir, a :

$$\Delta E = Jmc (t' - t).$$

Como ΔE no depende del modo de efectuar la transformación, representa la variación de energía de la masa m del gas, cuando ésta pase, de un modo cualquiera, de la temperatura t a la temperatura t' .

368. Variación de la temperatura de una masa de gas por compresión o expansión adiabáticas. — Cuando se produce una compresión adiabática de un gas (314), por ejemplo, al apoyar bruscamente un émbolo móvil contra un cilindro que contenga gas, el agente motor produce un trabajo \mathcal{C} ; pero el gas no produce ni recibe ninguna cantidad de calor. Por lo tanto, su energía interna aumenta en valor absoluto, en el valor \mathcal{C} del trabajo comunicado al gas. Por consiguiente, la temperatura del gas tiene, también, que aumentar; que es lo que ya nos ha demostrado la experimentación.

Por el contrario, si se expansiona un gas produciendo trabajo, por ejemplo, al rechazar un émbolo sometido a la presión atmosférica, comunica al exterior trabajo, sin producir ni apropiarse calor. En consecuencia, su energía interna, y, por lo tanto, su temperatura, tienen que disminuir*.

* En general, en la variación de energía interna, tenemos :

$$\Delta E = JQ - \mathcal{C} = -\mathcal{C}; \text{ puesto que } Q = 0.$$

Por otra parte, $\Delta E = Jmc (t' - t)$. Luego

$$-\mathcal{C} = Jmc (t' - t).$$

Se ve, pues, que, en caso de compresión $\mathcal{C} < 0$ y, por consiguiente $t' > t$. En caso de expansión $\mathcal{C} > 0$ y $t' < t$.

369. Principio de Carnot. — Rendimiento de las máquinas térmicas.
 — **Ciclo de Carnot.** — Si examinamos una máquina de vapor, vemos, en ella, un cuerpo, el agua, que recibe calor de un cuerpo caliente, la caldera, devolviendo una cantidad menor a otro cuerpo, más frío que la caldera, el condensador, sin dejar de realizar trabajo en el intervalo. Se ve, también, que si el condensador estuviese a la misma temperatura que la caldera, no podría efectuarse en la máquina ningún trabajo, porque, en este caso, serían iguales las presiones ejercidas en las dos caras del émbolo.

Sadi Carnot generalizó estas consideraciones enunciando la proposición siguiente, llamada *Principio de Carnot* :

Es imposible transformar calor en trabajo si no se tienen dos cuerpos a temperaturas diferentes. El agente de transformación quita calor al más caliente y lo comunica al más frío.

De ahí, resulta que el calor extraído del cuerpo más caliente (o *foco caliente*) no se transforma completamente en trabajo; puesto que devuelve parte de ese calor al cuerpo más frío (o *foco frío*).

Rendimiento de una máquina. — Llámase *rendimiento* o *coeficiente económico* de una máquina térmica, la fracción de calor tomada del foco caliente y transformada en trabajo.

Este rendimiento es necesariamente inferior a la unidad.

Para conseguir un rendimiento máximo, es preciso que, a cada momento, el agente de transformación no esté en contacto más que con cuerpos que posean igual temperatura que él. Si, en efecto, el agente, de temperatura t , se pone en comunicación con un cuerpo de temperatura más alta o más baja t' , el trabajo producido no puede ser todo lo grande posible, porque pudiera imaginarse una máquina térmica suplementaria, que funcionara entre las temperaturas t y t' y produjese nueva cantidad de trabajo.

Por otra parte, todo paso de calor de un cuerpo a otro por conductibilidad o radiación es perjudicial, porque constituye una caída de calor, sin producción de trabajo.

Cuando el agente de transformación se pone en contacto con uno de los dos focos, debe habersele dado la temperatura de este foco; de lo contrario no se obtendría rendimiento máximo. En contacto con dicho foco sufre una transformación *isoterma*; puesto que se verifica a temperatura constante. Además, al pasar el cuerpo de un foco a otro, no puede ni recibir ni perder calor; estas transformaciones son, pues, *adiabáticas*. El agente, evolucionando entre ambos focos, efectúa un ciclo cerrado de operaciones, denominado *ciclo de Carnot*: compónese de dos transformaciones isotermas y de otras dos adiabáticas.

Sean entonces Q la cantidad de calor tomada del foco caliente, durante cierto tiempo, y Q' la cantidad de calor comunicada, durante el mismo tiempo, al foco frío. No habiendo habido ninguna pérdida de calor por conductibilidad o radiación, la diferencia $Q - Q'$ ha sido transformada en trabajo, y el rendimiento R se expresa por la ecuación :

$$R = \frac{Q - Q'}{Q}.$$

Caso de la máquina de vapor. — Tomemos como ejemplo la máquina de vapor de condensador. El vapor, al abandonar la caldera se expande por el cilindro. Para obtener el rendimiento máximo, haría falta : 1^o que en el trayecto no hubiese ninguna pérdida de calor por conductibilidad o radiación; 2^o que la temperatura del vapor y del agua de condensación bajase, sólo por efecto de la expansión, hasta la temperatura del condensador. Finalmente, la misma agua, mezclada con vapor, y comprimida por una bomba especial, debería llegar a la caldera, a la temperatura de ésta. Estas condiciones se cumplen imperfectamente en las máquinas ordinarias.

Como vemos, las condiciones de rendimiento máximo son precisamente las condiciones de reversibilidad en todas las transformaciones que se producen en la máquina. Por lo tanto, una máquina que funcione según el ciclo de Carnot es reversible. Si funciona en sentido inverso, toma calor a la fuente fría, para dárselo a la caliente; pero, para esto, hay que proporcionarle trabajo.

Ciclo de Carnot de una máquina de vapor. — Si una máquina funcionase según las condiciones teóricas que preceden, el ciclo de Carnot descrito por el agua sería idéntico al siguiente. En un cilindro se halla colocada una masa de agua, y, encima de ella, hay un émbolo. En primer lugar, el agua está rodeada de un medio con temperatura absoluta T (foco caliente).

1^o Se eleva el émbolo, permitiendo que el calor penetre a través del cilindro y mantenga constante la temperatura del sistema. Supongamos que esta transformación se detiene en el momento en que el agua se vaporiza por completo; la presión permanecerá constante, igual a P, durante la transformación. En un diagrama en que las abscisas representan los volúmenes y las ordenadas las presiones, el punto imaginario de la transformación describe un segmento AB (fig. 364) de recta, paralelo al eje de los volúmenes. Durante esta fase, el foco ha comunicado al agua una cantidad Q de calor.

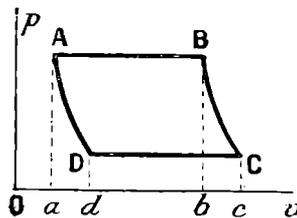


Fig. 364.

2^o Se rodea el cilindro de un medio impenetrable para el calor y produce una expansión adiabática que varía la temperatura hasta el valor T' (curva BC.)

3^o Pónese el cilindro en contacto con el foco frío, a la temperatura T' y se dirige el émbolo hacia atrás, de manera que produzca una compresión isoterma (recta CD). Detiéndose a un volumen adecuado Od, tal, que el punto D se encuentre en la misma curva adiabática que el punto A.

Durante esta fase, el vapor de agua, condensándose, devuelve una cantidad de calor Q'.

4^o Se comprime adiabáticamente el resto del calor, de modo que cuando el volumen inicial vuelva a su valor primitivo Oa, la temperatura sea T y la presión P.

Durante este ciclo, el agua efectúa un trabajo motor medido por el área del ciclo y consume una cantidad de calor Q - Q'.

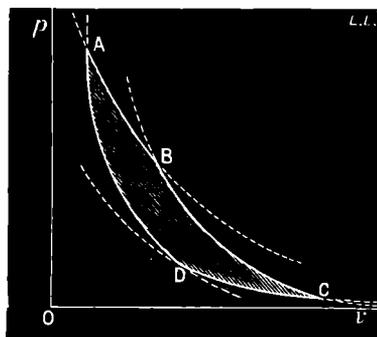


Fig. 365.

Máquina de gas perfecto. — Puede imaginarse una máquina térmica que funcione entre dos focos de calor y, en la cual, el agente de

transformación sea un gas. He aquí las condiciones teóricas en que el gas seguiría un ciclo de Carnot.

Se encuentra el gas debajo del émbolo, en un cilindro rodeado del foco caliente, cuya temperatura absoluta designaremos por T.

1° Se aumenta su volumen a temperatura constante T; el punto imaginario describe un segmento de isoterma AB (fig. 365). Durante esta fase, el gas recibe un calor Q.

2° Déjase al gas expansionarse adiabáticamente, y el punto imaginario describe el segmento BC de adiabática; al fin, el gas adquiere la temperatura absoluta T'.

3° Comprímese el gas poniendo el cilindro en contacto con el foco frío, a la temperatura absoluta T". El punto imaginario describe una porción de isoterma CD y devuelve una cantidad de calor Q'. Debe detenerse en el punto D que se halla en la misma adiabática que A.

4° Comprímese adiabáticamente el gas hasta que recobre la temperatura T (curva DA). Entonces, tiene los mismos volumen y presión que al principio, y el punto imaginario vuelve a su punto de partida.

Durante este ciclo, el gas consume una cantidad de calor Q — Q' y produce una cantidad de trabajo medida por el área del ciclo ABCD.

370. Teorema de Carnot. — Del principio de Carnot puede deducirse el importante teorema siguiente: *Todos los motores térmicos reversibles, que funcionan entre dos focos, de igual temperatura, tienen el mismo rendimiento.*

Este teorema significa que el rendimiento máximo que se puede obtener con máquinas que funcionen entre dos focos de temperaturas determinadas, no depende de la naturaleza del agente de transformación. Por consiguiente no se puede mejorar este rendimiento empleando tal agente de transformación en lugar de tal otro. El medio de mejorarlo consiste en acercarse cuanto sea posible a las condiciones del ciclo de Carnot en el funcionamiento de la máquina.

Demostración. — Sean M y M₁ dos motores reversibles, que funcionan entre dos mismos focos y en condiciones tales que, tomando al foco caliente las cantidades de calor q y q₁, transporten al foco frío una misma cantidad de calor q'.

Los dos motores suministrarán respectivamente los trabajos

$$J(q - q'), \quad J(q_1 - q').$$

y sus rendimientos serán respectivamente

$$R = \frac{q - q'}{q} = 1 - \frac{q'}{q}, \quad R_1 = \frac{q_1 - q'}{q_1} = 1 - \frac{q'}{q_1}.$$

Arreglemos los dos motores de manera que M tenga que funcionar en sentido inverso, bajo la acción de M₁. Si se supone q₁ > q, la combinación (M, M₁) suministrará también el trabajo:

$$J(q_1 - q') - J(q - q') = J(q_1 - q),$$

y esto sin que haya calor llevado al foco frío, puesto que éste suministra q' calorías a M y recibe q' calorías de M₁.

Como esta consecuencia se encuentra en contradicción con el principio de Carnot, no es posible tener q₁ > q. Se tiene, pues

$$q_1 \leq q; \quad \text{de donde} \quad R_1 \leq R.$$

Esta consecuencia es independiente de la naturaleza del motor M₁.

Luego, un motor, sea cual fuere, no puede dar rendimiento superior al de un motor reversible. Es lo que hemos demostrado ya (369).

Si el motor M₁ es reversible, se puede hacerle desempeñar en la demostración precedente el papel de M. Así se llegaría a la conclusión

$$R \leq R_1,$$

Las condiciones simultáneas

$$R_1 \leq R, \quad R \leq R_1,$$

exigen la igualdad

$$R = R_1.$$

Luego todos los motores térmicos reversibles tienen el mismo rendimiento máximo.

Valor del rendimiento máximo. — El rendimiento máximo, o rendimiento teórico, no puede, pues, depender sino de las temperaturas de los focos entre los cuales funciona el motor térmico. Sea T la *temperatura absoluta* del foco caliente y T' la temperatura absoluta del foco frío. Se ha demostrado que el rendimiento máximo R' lo da la relación

$$R' = \frac{T - T'}{T}.$$

Ejemplo. — Supongamos una máquina de vapor cuya caldera esté a 200° ($T = 200 + 273 = 473$) y el condensador, a 40° ($T' = 40 + 273 = 313$). El rendimiento no puede exceder del valor máximo

$$R' = \frac{473 - 313}{473} = 0,338.$$

Luego el calor transformado en trabajo se reduce a poco más de la tercera parte del calor tomado a la caldera.

371. Rendimiento de las máquinas reales. — Ya hemos visto que las mejores máquinas de émbolo producen un caballo-hora (o $75 \times 3\,600$ kilográmetros), por cada 0,700 kg. de carbón gastado. Un kg. de carbón da 8000 grandes calorías. Luego, por $8000 \times 0,700 = 5600$ calorías gastadas se recogerán

$$75 \times 3600 \text{ kgm. equivalente a } \frac{75 \times 3600}{426} = 634 \text{ calorías.}$$

Por lo tanto, no se ha transformado en trabajo más que la fracción

$$\frac{634}{5600} = 0,113$$

del calor aportado por el carbón, es decir, apenas más de la décima parte. Como una máquina ordinaria emplea 4 kg. de carbón por caballo-hora, no transforma en trabajo sino 2 centésimas partes del calor de combustión del carbón. Estos números demuestran que todavía son muy imperfectas nuestras máquinas térmicas.

Mejora del rendimiento de una máquina. — Se mejora el rendimiento de una máquina, aumentando la diferencia entre las temperaturas de sus focos caliente y frío. En efecto, según la fórmula

$$R' = \frac{T - T'}{T} = 1 - \frac{T'}{T},$$

se ve que el rendimiento R' será tanto mayor, cuanto mayor sea T y menor sea T' .

La temperatura del condensador no puede bajarse a más de 40° ; se ha tratado de aumentar el rendimiento elevando la temperatura de la caldera, lo que, por otra parte, no puede verificarse sin la correspondiente elevación de la presión del vapor. Por esta razón, las máquinas

de alta presión son más económicas que las de baja presión. Gracias al recalentamiento del vapor puede aumentarse el rendimiento sin dar al vapor una presión peligrosa.

Finalmente, de todas las máquinas térmicas, las que producen mayor rendimiento son los motores de explosión; lo cual se debe a que el foco caliente está, en éstas, a temperatura muy elevada, que es la temperatura de los gases en el momento de explosión.

372. Degradación de la energía. — Consideremos un sistema aislado de cuerpos; si se producen diversas transformaciones, la cantidad total de energía que ahí se encuentra, permanecerá constante; pero sus diversas formas se transformarán unas en otras. Estas transformaciones originan siempre la producción de cierta cantidad de energía calorífica, con perjuicio de las otras formas de energía. Por esta razón, los frotamientos y los choques transforman en calor una parte de la energía mecánica; lo mismo ocurre con los fenómenos de descarga eléctrica, fenómenos químicos, combustiones, etc. Al cabo de cierto tiempo toda la energía del sistema habrá pasado a la forma de calor. Luego, conforme al principio de Carnot, el calor no es enteramente transformable en trabajo: por esta razón se puede decir que representa una forma *degradada* de la energía. Para que hubiese transformación posible del calor del sistema en trabajo, sería preciso que las diversas partes de este sistema estuviesen a temperaturas diferentes; lo cual no podría durar siempre, puesto que las temperaturas tienden constantemente a ser iguales. Cuando se hubiera logrado este resultado, sería imposible, sin acción exterior, producir un trabajo mecánico o cualquier movimiento en el sistema. Luego la cantidad de energía transformable en trabajo disminuye continuamente en el Universo; dicese que la energía total se degrada sin cesar. Luego el Universo tiende a un estado de equilibrio, en el cual todos los cuerpos estarían en reposo, a la misma temperatura, y donde no sería posible ningún trabajo.

373. Manantial de la energía terrestre. — Las diversas formas de la energía que encontramos y utilizamos en la superficie de la Tierra, tienen todas por manantial la energía calorífica que irradia el Sol. Una parte queda almacenada sin transformación para ser devuelta después por radiación a los espacios intersidiales. Otra parte se transforma en la energía cinética de los vientos y de las corrientes marinas, que tienen por origen las diferencias de temperaturas originadas por el Sol; la energía de los vientos se transforma en la de las olas del mar al mismo tiempo. El calor solar evapora las aguas de los mares, produciendo luego la lluvia que alimenta los ríos. Por consiguiente, el trabajo de los saltos de agua que se utiliza en los molinos y fábricas hidráulicas, procede también del Sol.

En fin, se debe añadir a estos diversos efectos la importante acción clorofílica de los vegetales. En efecto, el Sol es el que procura a la clorofila la energía necesaria para la descomposición del anhídrido carbónico del aire y para la formación de los hidratos de carbono que constituyen los vegetales. Así es como éstos sirven directa o indirecta-

mente para la alimentación de los animales y, por consiguiente, para el trabajo de sus músculos : luego también éste tiene su origen en la energía solar. Lo mismo ocurre evidentemente respecto del calor de combustión de la madera o del carbón mineral, que representa cierta energía solar almacenada durante más o menos tiempo.

374. **Origen de la energía solar.** — En cuanto a la energía misma del Sol hay motivo para preguntarse de dónde proviene y cómo puede desprender este astro la inmensa cantidad de calor que irradia por todas partes *. La hipótesis más sencilla es que el Sol es un cuerpo caliente que se enfría; pero no es suficiente ni satisfactoria. Es cierto también que ocurren reacciones químicas en el Sol, resultando así análogo a una inmensa hoguera. También se ha invocado la caída de meteoritos, que, atraídos por el Sol, llegan a él con una enorme velocidad y, por la aniquilación de su energía cinética, producen calor; pero es probable que esta causa, que existe realmente, no debe suministrar una cantidad considerable de energía calorífica al Sol. También se admite otra más importante, que es la disminución del diámetro solar. De este modo, las materias de la periferia se acercan al centro, y, mediante el enorme valor de la gravedad en la superficie del sol, resulta una disminución considerable de la energía potencial, que se transforma así en calor. Hay que advertir que, conforme a la teoría cosmogónica de Laplace y Herschell, así han pasado siempre las cosas, sin que haya dejado de reducirse la nebulosa solar a medida que perdía calor.

En fin, M. Arrhenius ha hecho notar que en las partes centrales del Sol debe de reinar una temperatura incomparablemente más elevada que en la superficie, y al mismo tiempo una enorme presión. Luego los compuestos producidos a alta temperatura son endotérmicos, es decir que han debido de absorber energía para formarse. Si estos compuestos son conducidos a la superficie por las erupciones solares, son reducidos a una temperatura más baja, y se transforman emitiendo calor. Esto explica por qué los periodos de gran actividad solar, revelados por la abundancia de manchas que acompañan las erupciones, se manifiestan igualmente por un aumento de la radiación calorífica del astro.

375. **Trabajo muscular y calor animal.** — Mayer fué quien primero tuvo la idea de comparar el animal a una especie de máquina térmica, en que el calor, debido a la respiración, se transforma parcialmente en trabajo muscular.

Experimentos de Hirn. — Hirn ha confirmado esta hipótesis experimentalmente.

Puso a un hombre en una garita cerrada, y observó los efectos caloríficos y químicos de su respiración, primero cuando se encontraba en reposo y, después, cuando trabajaba en elevar su propio peso sobre la circunferencia de una rueda móvil. Dos tubos de caucho llegaban a la boca del sujeto, uno que le llevaba desde un gasómetro aforado el aire necesario para la respiración, y el otro conducía el aire espirado a otro gasómetro también aforado : esto permitía medir el oxígeno consumido y el ácido carbónico producido. La temperatura del aire en la garita se elevaba progresivamente y llegaba a ser constante cuando el calor perdido por radiación llegaba a ser igual al que se producía en el organismo. Después, se reemplazaba el hombre vivo por la llama de un mechero de gas, que se arreglaba de manera a propósito para obtener que el aire de la garita se elevase a la misma temperatura constante. Del volumen del gas quemado, se deducía la cantidad de calor producida por el mechero de gas, y, en consecuencia, la cantidad emitida por el hombre en un tiempo dado.

En estado de reposo, éste consumía 30 gramos de oxígeno por hora y por 150 calorías producidas : cuando subía en la rueda, consumía 130 gramos de oxígeno, y el número de calorías correspondientes, que hubiera debido ser de 750, sólo era de 250. Luego 500 calorías eran consumidas por el trabajo muscular.

Obsérvase el efecto inverso, cuando un hombre recibe trabajo en vez de producirlo, si baja en vez de subir : a 30 gramos de oxígeno absorbido corresponde un desprendimiento superior a 150 calorías, debiéndose el exceso de calor al trabajo exterior de la gravedad durante el descenso.

El gasto total de energía es siempre superior al trabajo mecánico producido; puesto que, aun en reposo, el organismo desprende constantemente calor. Además, cuando un

* La Tierra no recibe más que la 50ª millonésima parte. El calor solar emitido por segundo es igual a la que resultaría de la combustión de once cuatrillones seiscientos mil millones de toneladas de hulla.

músculo sostiene una carga, sin moverla de un lado a otro, y, por consiguiente, sin producir trabajo, resulta mayor consumo de energía a causa de la combustión más activa de las materias nutritivas. Este gasto de energía se convierte completamente en calor, y es aún más activa cuando el músculo trabaja llevando la carga.

Experimentos de M. Chauveau. — En 1901 hizo Chauveau muchos experimentos con objeto de estudiar el rendimiento en trabajo efectivo, del gasto total de energía. El trabajo, motor o resistente, de un sujeto, era producido, como en los experimentos de Hirn, con una rueda movable: el sujeto trabajaba al aire libre; el producto de su respiración se recogía con un aspirador de válvula adaptado a su nariz, el cual estaba unido a un gasómetro por medio de un tubo de caucho. Analizando los gases espirados se podía evaluar el gasto total de energía durante el trabajo y sus variaciones, según las condiciones del trabajo. He aquí algunos de sus resultados:

Quando el valor del trabajo mecánico varía, siendo la misma su duración, por causa de una variación de la carga movida, el gasto correlativo de energía varía en el mismo sentido que el trabajo y proporcionalmente a él. Para un kilográmetro producido por el sujeto, el gasto equivale a 5 kilográmetros para el trabajo motor y a 2^{*5m} ,580 para el trabajo resistente.

Quando el valor del trabajo varía, siendo la misma la duración, por causa de una variación de longitud del camino recorrido, el gasto varía siempre en el mismo sentido que el trabajo, pero jamás proporcionalmente. El aumento del gasto es siempre más débil que el del trabajo exterior: por consiguiente, el trabajo *rápido*, motor o resistente, se efectúa con más economía que el trabajo *lento*.

Experimentos de Atwater. — Estos experimentos han probado que la energía calorífica o mecánica, que proviene de las transformaciones de los alimentos en el cuerpo humano, es igual a la que estos alimentos hubieran dado si se los hubiese transformado por medio de aparatos de laboratorio.

En un cuarto metálico de tres paredes, para evitar toda pérdida de calor, un hombre sometido al experimento vivió varios días tomando alimentos previamente analizados. Después se recogieron todas sus excreciones y se analizaron. El sujeto podía efectuar ciertos trabajos de diferente naturaleza. El resultado de una serie de experimentos hechos en 1904 fué el siguiente. Después de haber hecho vivir en su aparato a varios hombres, durante 155 días, encontró que la suma de la energía, calorífica o mecánica que ellos habían producido, equivalía a 449 950 calorías. Ahora bien, calculando la energía correspondiente a los alimentos transformados en los mismos productos, encontró 450 000 calorías. Estos resultados demuestran bien que la energía de los fenómenos vitales tiene su único origen en las transformaciones químicas que sufren los alimentos en los cuerpos.

CAPÍTULO XV

CONDUCTIBILIDAD CALORÍFICA DE LOS SÓLIDOS, DE LOS LÍQUIDOS Y DE LOS GASES

376. Propagación del calor por radiación y por conductibilidad. — **Conductibilidad de los sólidos.** — El calor puede propagarse de un manantial por radiación a través del medio que rodea ese manantial. Esta propagación se efectúa con una velocidad muy grande. El *calor radiante* debe asimilarse a la luz cuyas leyes sigue y reconoce la misma causa. Por eso vamos a estudiar sus propiedades al mismo tiempo que las de la luz.

El calor puede propagarse también por *conductibilidad*. Si se introduce en el fuego el extremo de una barra de hierro, al cabo de poco tiempo, el otro extremo se calienta mucho. Por el contrario, se puede agarrar,

sin quemarse, un extremo de un trozo de madera. estando en combustión el otro extremo. Se dice que el hierro *conduce* el calor, mientras que la madera no lo conduce. *Conductibilidad* es la propiedad que poseen los cuerpos de *transmitir el calor, de molécula en molécula, a través de su masa*.

Se da el nombre de *buenos conductores* a los cuerpos que lo transmiten fácilmente, como los metales y denominanse *malos conductores* aquellos que lo transmiten más o menos lentamente, como la madera, el vidrio, las resinas, etc., y sobre todo, los líquidos y gases.

Conductibilidad de los sólidos. — Se pueden comparar muy fácilmente los sólidos, desde el punto de vista de su conductibilidad. Basta sumergir en agua hirviendo los extremos de varillas de diversas sustancias, plata, cobre, hierro, madera, cristal, cubiertas exteriormente de cera o parafina. Se ve que la cera se derrite más o menos arriba de las varillas; la conductibilidad de la varilla es evidentemente tanto más grande cuanto más lejos se ha fundido la cera.

La plata es el cuerpo que tiene mayor conductibilidad calorífica.

Luego, en orden de conductibilidad decreciente, vienen el cobre, oro, estaño, hierro, plomo, platino, etc.

377. **Leyes de la conductibilidad.** — **Teoría de Fourier.** — Fourier enunció *a priori* las leyes de conductibilidad, y trató teóricamente dos casos, conocidos con el nombre de *problema del muro* y *problema de la barra*. Las leyes descubiertas por Fourier fueron establecidas, por la experimentación, posteriormente.

Problema del muro. — En este problema, se imagina una placa de una sustancia, comprendida entre dos planos paralelos e indefinidos. Una de las caras de la placa se halla sumergida en un medio de temperatura T , y la otra, en otro medio de temperatura más baja t . Los experimentos demuestran que entre las dos caras la temperatura varía *linealmente*, es decir, que la variación de temperatura a lo largo de un segmento de una perpendicular a las caras es proporcional a la longitud de éste segmento.

De ahí, dedúcese que la cantidad de calor que atraviesa en la unidad de tiempo, cualquier superficie S paralela a las caras del muro es: 1º independiente de la posición de esta superficie y proporcional a su área S ; 2º proporcional a la diferencia de temperatura $T - t$ que existe entre las caras del muro; 3º inversamente proporcional al espesor e del muro. Por lo tanto, puede representarse por la fórmula

$$[1] \quad Q = K \frac{S(T - t)}{e}.$$

K representa la cantidad de calor que atraviesa en la unidad de tiempo, la unidad de superficie, en un muro que tenga un espesor igual a la unidad de longitud y entro cuyas caras exista una diferencia de temperatura de 1º. K depende de la sustancia del muro y se llama *coeficiente de conductibilidad* de esta sustancia.

Pero, en la práctica, las dos caras del muro se hallan siempre cubiertas de una sustancia extraña a la que constituye el muro, y que, en general, ofrece gran resistencia al paso del calor. Por ejemplo, si se calienta agua en un vaso de metal, por la parte del fuego hay una pequeña capa de gas que se adhiere al metal; mientras que, por la parte del agua, se adhiere, a su vez, una ligera capa de agua. Como la conductibilidad de estas capas *inmóviles* es muy reducida, resulta un fenómeno que, a primera vista, puede parecer paradójico, y es que una masa de agua se calienta con la misma rapidez, en el mismo fuego y con la misma superficie de calefacción, en vasos de espesor y de sustancia diferentes.

Por esta razón se hace difícil el estudio experimental del caso del muro.

Problema de la barra. — Fourier resolvió por cálculo el problema de la conductibilidad, en una barra prismática *suficientemente delgada* para que todos los puntos de una misma sección transversal estuviesen, en el mismo momento, a *igual temperatura*, y *suficientemente larga* para que, estando uno de sus extremos mantenido a temperatura constante más o menos elevada, el otro extremo conservase una temperatura igual a la tempera

tura ambiente. Tomando como incógnita el exceso de temperatura θ , sobre la temperatura ambiente, de una sección colocada a distancia x del foco, halló la fórmula

$$[2] \quad \theta = \theta_0 e^{-ax},$$

en que θ_0 es una constante que representa el exceso de temperatura, al principio (es decir en el punto para el que $x = 0$); e , la base de los logaritmos neperianos, y a , un coeficiente que es constante para una misma sustancia.

Relación entre el coeficiente a y el coeficiente K . — Sean a y a' las constantes de dos barras de sustancias diferentes; K y K' los coeficientes respectivos de conductibilidad; se puede demostrar que estas cuatro cantidades están ligadas por la relación

[3] $\frac{K}{K'} = \frac{a'^2}{a^2}$, a condición que las superficies exteriores de las barras tengan igual conductibilidad exterior. Para cumplir esta condición, basta recubrirlas con una ligera capa de un mismo barniz.

378. Estudio experimental. — Los experimentos de Despretz y después los de Wiedemann y Franz han comprobado las teorías de Fourier y han permitido además medir con precisión los coeficientes de conductibilidad de los cuerpos sólidos.

1º Experimentos de Despretz. — Practicábase de decímetro en decímetro en una barra prismática pequeñas cavidades, que se llenan de mercurio y en cada una de las cuales se introduce el depósito de un pequeño termómetro. Cuando se expone la barra por una de sus puntas a un foco de calor que le comunique temperatura constante, se ve que los termómetros suben sucesivamente a partir del foco, a temperaturas fijas, que decrecen de un termómetro al siguiente.

De esta manera descubrió Despretz una ley relativa a los metales buenos conductores (oro, plata, cobre); esa ley se deduce por lo demás de las fórmulas de Fourier:

Tratándose de puntos cuyas distancias al foco crecen en progresión aritmética, los excesos de temperatura disminuyen en progresión geométrica.

2º Experimentos de Wiedemann y Franz. — Al practicar cavidades en la superficie de las barras, Despretz destruía parcialmente la continuidad de los metales. Wiedemann y Franz evitaron este inconveniente midiendo los excesos de temperatura por medio de un elemento termo-eléctrico (241), que aplicaban sucesivamente a los diferentes puntos de las barras.

Las barras metálicas eran lo más regulares posible y se encontraban en un sitio de temperatura constante. Uno de sus extremos estaba en comunicación con un foco calorífico a temperatura constante.

Experimentos de M. A. Berget. — M. Berget se ha servido de la solución del problema del muro para medir con precisión las conductibilidades del mercurio y de los metales.

Primero justificó su método verificando la distribución lineal de las temperaturas dentro del muro de Fourier, efectuándolo en su aparato.

Notó igualmente que los tiempos necesarios para establecer el régimen permanente en dos muros de igual naturaleza, teniendo espesores diferentes, son proporcionales a los cuadrados de sus espesores.

Así encontró, para el coeficiente de conductibilidad K del mercurio, el valor 0,02015 (en unidades C.G.S.).

Finalmente ha generalizado su método, haciendolo extensivo a la conductibilidad de los sólidos, y ha encontrado los valores siguientes de los coeficientes.

Cobre	1,0405	Hierro.	0,1587	Antimonio	0,042
Cinc.	0,303	Estaño.	0,151	Bismuto	0,0201
Latón	0,2625	Plomo.	0,0810	Mercurio	0,02015

379. Conductibilidad de los líquidos. — *Convección.* — La conductibilidad de los líquidos es sumamente escasa: únicamente se exceptúa el mercurio, que es un metal.

Convection. — Cuando se calienta por su parte inferior un líquido contenido en un vaso, las partes calentadas del líquido se vuelven más ligeras y suben; por el contrario, las masas frías todavía caen al fondo del vaso. Es fácil poner de manifiesto estas corrientes echando serrín en el vaso. Estas corrientes transmiten el calor a todo el líquido. Los

físicos ingleses han caracterizado esta manera de propagarse el calor, llamándola « *convection* » que quiere decir *transporte*.

Luego el calor de un líquido calentado de este modo no se debe atribuir a su conductibilidad. Se puede demostrar que ésta es débil, calentando por arriba un tubo que contenga agua, la cual puede llegar a ebullición cuando todavía están frías las partes inferiores, hasta el punto de que un pedazo de hielo se funde con lentitud.

Experimentos de Despretz. — Sin embargo, la conductibilidad de los líquidos, excepto el mercurio, no es nula. Así resulta de los experimentos de Despretz, el cual calentaba un líquido por arriba y estudiaba cómo varía la temperatura de arriba abajo. De este modo notó que el calor se propaga en los líquidos siguiendo la misma ley que en las barras metálicas, pero que su conductibilidad es incomparablemente más débil.

380. Conductibilidad de los gases. — No es posible estimar directamente la conductibilidad de los gases por causa de su considerable poder diatérmico y de la extremada movilidad de sus moléculas: pero cuando se encuentran impedidos en sus movimientos, su conductibilidad parece *ser casi nula*.

Luego casi exclusivamente por *convection* se transmite el calor en su masa. Las corrientes gaseosas debidas a la *convection* se hacen visibles por la diferencia de índice de refracción que existe entre el aire caliente y el aire frío: de este modo se ve subir el aire por encima de una superficie muy caliente.

También se puede ver la corriente de aire caliente que sube de un calorífero, por ejemplo, colocando encima un molinete con eje vertical, el cual se pone a dar vueltas, movido por la corriente de aire caliente.

Y si las sustancias filamentosas, paja, algodón, plumón, pieles, etc., presentan mucha resistencia a la conductibilidad, es porque suprimen la propagación por transporte en la masa de aire que encierran e inmobilizan en sus intersticios.

381. Aplicaciones de la conductibilidad y de la mala conductibilidad de los cuerpos. — **Aislamiento térmico.** — 1º *Sensación de calor y de frío.* — Cuando se toca un cuerpo frío, la sensación que produce depende no sólo de su temperatura, sino también de su conductibilidad. En igualdad de temperatura, un trozo de metal parece siempre más frío que otro de madera. Esto se debe a que en este último cuerpo, que es mal conductor, el calor que la mano le cede queda localizado en los puntos tocados, cuya temperatura eleva aquélla rápidamente; mientras que, en el metal, el calor se esparce por toda su masa y entonces, aumenta un poco la temperatura de los puntos en contacto con la mano. Por razón análoga, un metal algo caliente produce más viva impresión de calor que un cuerpo mal conductor que tenga la misma temperatura.

2º *Propiedades de las telas metálicas.* — *Lámpara de seguridad.* — Cuando se corta una llama (de gas, por ejemplo), por una tela metálica, nótese que la llama no continúa por cima de la tela metálica (fig. 366).

Esta, a causa de su conductibilidad, reparte por toda su masa, y luego, cede al medio

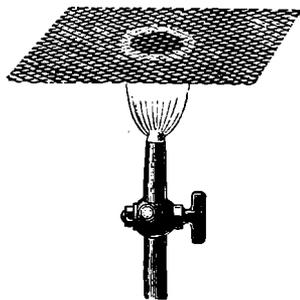


Fig. 366.

ambiente, el calor que recibía de la llama. Los gases de esta llama, después de pasar a través de la tela metálica, están demasiado fríos para continuar ardiendo.

Davy aplicó esta propiedad a la lámpara de mineros o lámpara de seguridad.

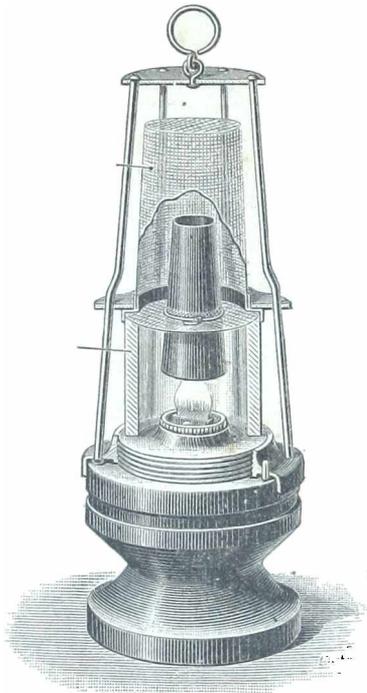


Fig. 367.

Esta lámpara (fig. 367), perfeccionada por Combes, tiene la mecha rodeada por un cilindro de vidrio coronado con un casquete continuo de tela metálica. Si la atmósfera contiene grisú, este gas puede inflamarse en el interior de la lámpara; pero, gracias a la tela metálica, no se propaga la combustión al exterior.

3º *Aislamiento térmico.* — Los cuerpos malos conductores son muy empleados, ya para preservar a los cuerpos calientes del enfriamiento, ya para impedir que se calienten los cuerpos fríos. Realizan lo que se llama *aislamiento térmico*. De este modo, se conservará mucho tiempo un líquido caliente o frío encerrándolo en un vaso de dobles paredes, entre las cuales contenga materias malas conductoras: corcho, serrín, vidrio machacado, carbón pulverizado, paja, etc. Asimismo, para conservar el hielo durante el verano, se lo rodea de paja o de una manta de lana. El aislamiento térmico nunca es perfecto porque el calor se propaga lentamente, aun a través de los peores conductores.

El mejor aislamiento térmico se obtiene en los vasos de aire líquido (311) que permiten conservar cuerpos muy fríos sin que reciban calor del exterior, y también, conservar líquidos muy calientes, cuya temperatura sólo baja con lentitud extremada.

En las instalaciones frigoríficas se usa mucho, como aislador térmico o *calorifugo*, el corcho aglomerado.

En fin, cuando se quiere evitar que los tubos de vapor pierdan calor, se los envuelve en amianto, que es el mejor calorifugo para temperaturas elevadas.

En las habitaciones, que deben estar todo lo aisladas térmicamente que sea posible para evitar el frío durante el invierno y el calor en verano, es de notar que los muros de ladrillo aíslan mejor, en igualdad de espesor, que los de mampostería ordinaria.

Por otra parte, en Rusia y Siberia, muchas casas están completamente preservadas contra el frío, porque sus paredes se hallan formadas por dos tabiques de madera, entre los cuales se introduce paja o serrín.

Finalmente, en nuestras viviendas, como los cambios de calor con el exterior se efectúan especialmente por los cristales de las ventanas, se emplea, con ventaja, para preservarse del frío, ventanas dobles, que aprisionan entre sí una capa de aire mala conductora.

El aislamiento térmico del cuerpo humano se consigue con vestidos que protegen contra el frío en invierno y contra el excesivo calor en verano. Las telas con que se hacen los vestidos son sobre todo aisladoras por el aire que encierran entre sus fibras. La lana y la seda son las más aisladoras.

CAPÍTULO XVI

APLICACIONES, CALEFACCIÓN Y VENTILACIÓN

382. *Chimeneas.* — Sábese que las chimeneas son fogones descubiertos, dispuestos contra la pared, y coronados por un cañón que sirve para el desprendimiento de los productos de la combustión.

Por muchos perfeccionamientos que se hayan introducido en la construcción de las chimeneas, todavía son el modo de calefacción más imperfecto en el terreno económico, pues no utilizan con la madera más que 6 por 100 del calor total emitido por el combustible, y 13 por 100 con el cok y la hulla; esto se debe a que la corriente de aire necesaria para la combustión arrastra siempre consigo al exterior parte considerable del calor producido. Sin embargo, son el método de calefacción más agradable y sano, por causa de la presencia del fuego y de la renovación continua del aire en las habitaciones que el tiro produce.

Tiro de las chimeneas. — Se entiende por tiro de una chimenea una corriente de aire de abajo arriba que se establece en el cañón por efecto de la subida de los productos de la combustión; cuando la corriente es rápida y continua, se dice que la chimenea tira bien.

El tiro se debe a la diferencia de las temperaturas dentro y fuera del cañón. En efecto, el peso de la columna gaseosa CD (fig. 368) del cañón es menor que el de la columna de aire exterior AB, de la misma altura, por lo cual resulta desde fuera hacia dentro de la chimenea un exceso de presión que expulsa los productos de la combustión: este movimiento es tanto más rápido cuanto mayor es la diferencia de peso entre las dos masas gaseosas.

Las condiciones de un buen tiro en una chimenea, son las siguientes:

1º La sección del cañón no debe ser muy grande; porque pueden establecerse al mismo tiempo corrientes ascendentes y corrientes descendentes, y la chimenea da humo.

2º El tubo de la chimenea debe ser suficientemente elevado; pues el exceso de la presión exterior será tanto mayor cuanto más alta sea la columna de aire.

3º El aire exterior debe poder penetrar en la habitación con rapidez suficiente para responder al llamamiento del fogón. En un cuarto herméticamente cerrado no podría prolongarse la combustión, o bien se establecerían corrientes de aire descendentes que harían bajar el humo.

4º Debe evitarse que comuniquen entre sí dos cañones de chimenea; pues si uno tira más que otro puede producirse una corriente de aire descendente que haga humo.

El tiro tiene por efecto disminuir la presión en el cuarto calentado y por consiguiente atraer el aire frío exterior por todas las aberturas del cuarto. Se han hecho algunas mejoras en las chimeneas agregándoles un cañón por donde es aspirado el aire exterior, pero dispuesto de tal manera que el aire llegue a la habitación después de haberse calentado en el fogón.

383. *Estufas.* — Las estufas son aparatos de calefacción de fogón aislado, que se colocan en el centro mismo de la masa de aire que se trata de calentar, de modo que el calor irradie en todas direcciones alrededor del hogar. La parte inferior da paso al aire necesario para la combustión, cuyos productos se desprenden en la superior por tubos de fundición más o menos largos.

Como los productos gaseosos no llegan al exterior sino ya muy fríos, lógrase utilizar casi la totalidad del calor producido; por tal razón, resulta más económico este método; pero dista mucho de ser tan salubre como las chimeneas, pues sólo da ventilación muy escasa: puede hasta decirse que ésta es nula cuando el aire se toma fuera de la habitación. Además, las estufas presentan el inconveniente de difundir olor desagradable y emanaciones deletéreas, sobre todo cuando son de hierro colado o de palastro. Esto se puede atribuir a la descomposición de las materias orgánicas del aire por su contacto con las paredes calientes de los tubos, y también a los gases del fogón, para los cuales se hace permeable el hierro fundido a temperatura elevada.

Estos inconvenientes se han remediado en parte con un revestimiento anterior de tierra refractora, que impide que se ponga roja la cubierta metálica, y también empleando palastro de acero, que es menos permeable que el hierro colado.

Estufas de combustión lenta. — En estas estufas se puede arreglar el tiro cerrando más o menos el orificio por donde llega el aire. Como, por otra parte, contienen una provisión suficiente de combustible, pueden continuar ardiendo toda la noche; por con-

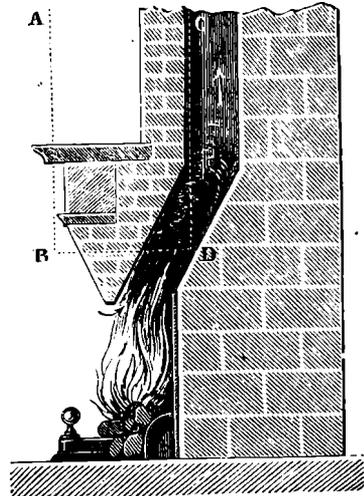


Fig. 368.

siguiente se puede mantener el fuego todo el invierno. Pero, como producen mucho óxido de carbono, es indispensable que su conducto de evacuación desemboque en una chimenea de buen tiro; pues de otro modo su empleo es peligroso.

384. Caloríferos y ventiladores : generalidades. — Los anteriores métodos de calefacción sólo convienen a pequeñas habitaciones. Para locales grandes es más conveniente producir calor en un solo punto en un aparato llamado *calorífero*, y distribuirlo por todo el local. Este sistema se denomina *calefacción central*. Al mismo tiempo se debe procurar asegurar la ventilación, es decir renovar el aire viciado.

En lo que se refiere a la calefacción, hoy se prefiere el aire frío al caliente; por eso se debe procurar sobre todo calentar las paredes frías, que irradian después el calor por la habitación sin calentar el aire. Por esta razón se deben distribuir las superficies de calefacción al pie de las paredes frías, y, especialmente, en los alféizares de las ventanas. En cuanto a la ventilación, se debe tratar de que llegue el aire fresco a toda la habitación, haciendo que el aire viciado salga por arriba de las habitaciones; también se deben evitar las corrientes de aire que podrían resultar de entradas mal dispuestas, o de la acción de las paredes frías. El aire que entra en las habitaciones conviene calentarlo muy poco. Generalmente, la diferencia de las densidades basta para que el aire caliente y viciado salga por las aberturas practicadas en lo alto de las habitaciones,

atrayendo el aire frío y puro por otras aberturas dirigidas hacia el suelo. Cuando no baste este medio se emplean *ventiladores mecánicos*, que son como molinitos de viento, compuestos de una rueda con aspas y movidos por cualquier motor. Estos ventiladores sirven, ya para evacuar el aire viciado de las habitaciones, ya para esparcir el aire puro de afuera.

385. Calefacción por el aire caliente. — **Caloríferos de aire.** — La calefacción por el aire caliente consiste en calentar aire en la parte inferior de un edificio, y dejarlo subir después hasta los pisos superiores, en virtud de su menor densidad, por una tubería instalada en las paredes.

Estos caloríferos se disponen de diversas maneras.

He aquí uno de los sistemas más empleados. En las bodegas, se establece una especie de estufa (fig. 369) en forma de campana, cuya superficie exterior está provista

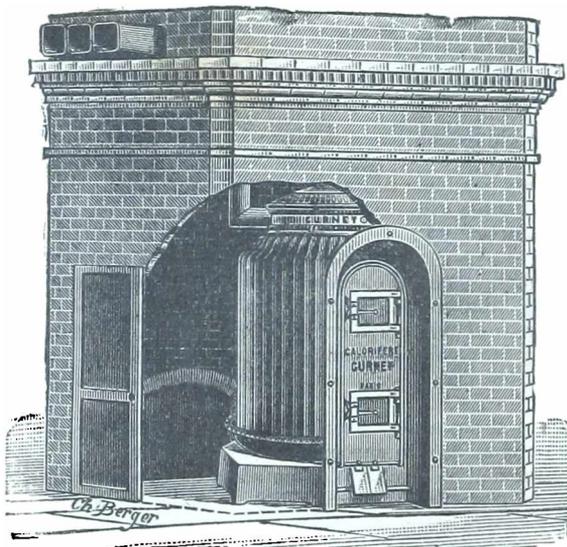


Fig. 369.

de vista de aspas de fundición, para aumentar la superficie. Los productos de la combustión son eliminados por un tubo. Alrededor de la estufa se construye una *cámara de calor* de ladrillo, que comunica con el aire exterior por una abertura colocada en su parte inferior y no representada en la figura. Calentado el aire al contacto de la estufa, sale en seguida por los tubos y por medio de los tubitos va a parar a las habitaciones que debe calentar. Las aberturas por las cuales penetra de este modo en los pisos se denominan *bocas de calor*.

El calorífero representado en la figura 369 es un calorífero Gurney. Contiene un perfeccionamiento interesante. La campana de la estufa descansa en una cubeta en donde se introduce agua. De este modo, el aire arrastra consigo una pequeña cantidad de vapor de agua, que lo vuelve más higiénico que el aire seco.

386. Calefacción por agua caliente. — **Caloríferos de agua.** — La calefacción por agua caliente se obtiene por medio de un movimiento circulatorio continuo de agua que, después de calentarse en una caldera, se eleva a una serie de tubos; luego, una vez fría, vuelve, atravesando las habitaciones de los pisos, a la caldera, por una serie de tubos parecidos.

El calorífero instalado en las bodegas consiste en una caldera C (fig. 370, I), en forma de campana, provista de un fogón interior. En la parte superior de la caldera hay un largo

tubo fijo T, que llega a un depósito A, situado en la parte más alta del edificio que se quiere calentar.

Como la caldera y el tubo están llenos de agua, así como también parte del depósito, a medida que ésta se calienta en la caldera, produce una corriente ascendente de agua caliente en el tubo hasta el depósito mientras que, al mismo tiempo se establecen corrientes descendentes de agua más fría y densa, que parten de la región inferior de este depósito y van respectivamente por otros tantos tubos T a los radiadores R y R'. Estos son tubos lisos o con aletas, que ofrecen gran superficie de radiación. Después, continúa la corriente por los tubos de retorno, hasta la parte inferior de la caldera. Durante este doble recorrido el agua caliente cede su calor a los tubos y radiadores, que, de este modo, se convierten en verdaderas estufas de agua.

También se puede instalar en un piso de varias piezas la calefacción central por agua caliente, toda vez que se pueden colocar la caldera y los radiadores en un mismo plano.

387. Calefacción por el vapor. — Caloríferos de vapor. — La propiedad que tiene el

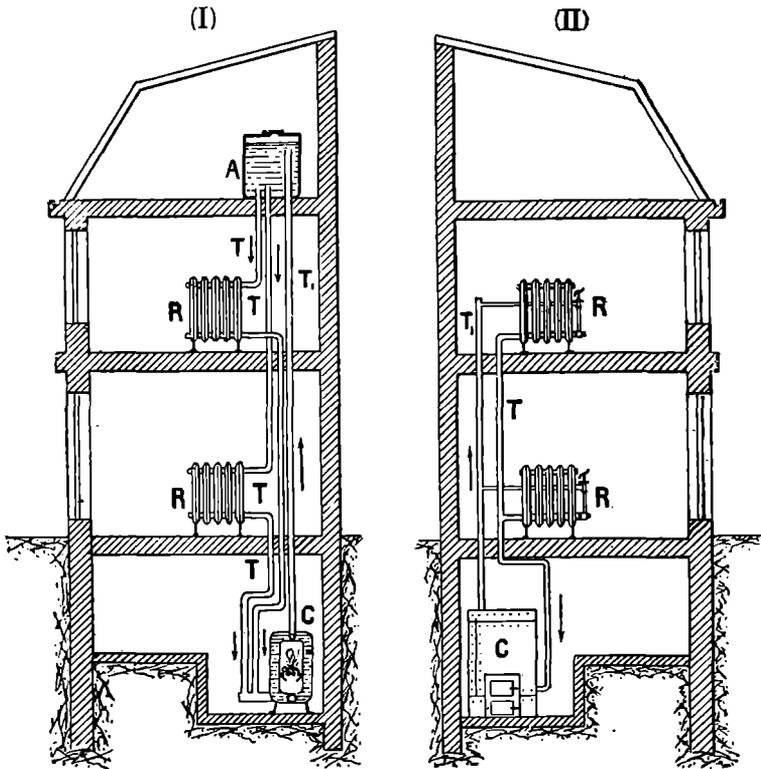


Fig. 370.

vapor de agua do restituir su calor de vaporización cuando se condensa, se utiliza para la calefacción. Para eso se produce vapor en calderas C (fig. 370. II) análogas a las de las máquinas de vapor. Los tubos T, aislados térmicamente conducen el vapor seco a los locales que se han de calentar; en seguida atraviesa, condensándose, los radiadores que haya y vuelve al calorífero por otros tubos T.

Los radiadores destinados a distribuir el calor por las salas son de hierro o fundición y adoptan formas variadas. A veces, son superficies cilíndricas de paredes lisas o veteadas; otras, tubos lisos o provistos de espas destinadas a aumentar la superficie de calefacción en relación con el aire. La figura 371 presenta uno de estos radiadores RR', dispuesto de este modo. El vapor llega a él por el tubo T; el agua de condensación sale por el tubo T'. El aire exterior se introduce por una abertura O que puede abrirse y cerrarse a voluntad; este aire exterior, calentado al contacto de los tubos RR', va en seguida al piso, asegurando, de este modo, la calefacción y ventilación al mismo tiempo.

388. Ariete termohidráulico de Bunau-Varilla. — Bunau-Varilla inventó este aparato

para determinar una circulación automática de agua para enfriar las paredes de los moldes de clisés de imprenta.

El molde M (fig. 372), lleno de aleación en fusión, está en una caja metálica con agua

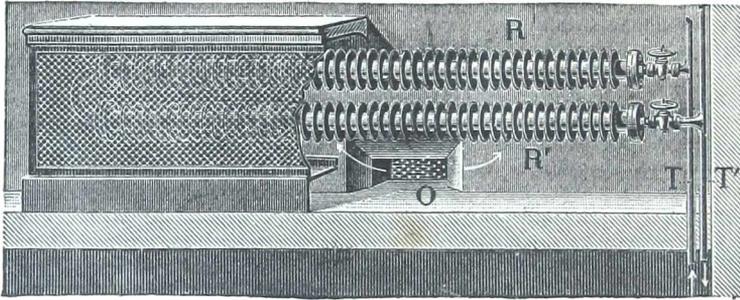


Fig. 371.

que hierve. La presión que de ahí resulta sobre la superficie *mn*, rechaza el agua al tubo *aa'*, porque la acción de la válvula *s*, impide que salga el agua por el tubo *v*.

Desde que el punto *a* del tubo *aa'* queda descubierto, el agua contenida en la columna *a'* disminuye gradualmente de altura. Por consiguiente la resistencia disminuye, mientras que la fuerza de expulsión permanece sensiblemente constante. Entonces el agua es evacuada con una velocidad acelerada y brota como el agua de un geyser en el depósito *R*, levantando la válvula *s*. Tan pronto como el tubo *aa'* queda vacío de agua y de vapor, la válvula *s* se cierra naturalmente. En ese momento la presión atmosférica reina casi en la superficie *mn* y en el interior del tubo *aa'*.

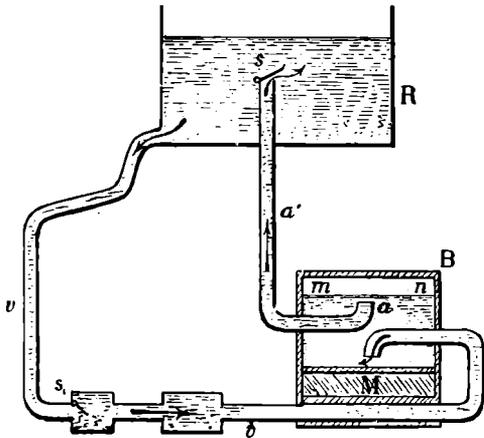


Fig. 372.

la figura) enfriados por el aire exterior, se condensa en ellos, en su mayor parte, y vuelve a caer al depósito *R*.

Antes de los trabajos de Bunau-Varilla, la máquina de fundir moldes de imprenta, llamada *autoplato*, exigía un gasto de 30 metros cúbicos de agua para la fabricación de unos 300 moldes.

Hoy, gracias a la circulación automática, este gasto se reduce a 25 litros. Es más de mil veces menor de lo que antes era.

LIBRO VI

MOVIMIENTOS VIBRATORIOS. — ACÚSTICA

CAPÍTULO I

PROPIEDADES DE LOS MOVIMIENTOS VIBRATORIOS

389. **Movimiento oscilatorio de una lámina metálica. — Diapasón.** — El movimiento vibratorio más sencillo es el de una lámina metálica, por ejemplo, una lámina de acero (fig. 373), sujeta por uno de sus extremos, separada de su posición de equilibrio y abandonada después de esta separación. Entonces, ejecuta una serie de oscilaciones que durarian indefinidamente, si no hubiera pérdidas de energía.

Este movimiento oscilatorio es completamente análogo al de un péndulo. Si la lámina es suficientemente delgada y larga, las oscilaciones son lo bastante lentas para poderlas seguir con la vista. De este modo, puede reconocerse, como se hizo en el péndulo, que las oscilaciones de *pequeña amplitud* son *isócronas*.

Mas, si la lámina es corta o gruesa, las oscilaciones son muy rápidas y no se las puede observar directamente.

Diapasón. — Este es el caso de las oscilaciones

del *diapasón*. Consiste tal aparato en una gruesa lámina de acero encorvada (fig. 374) que se pone en vibración golpeándola, o bien froándola con un arco pasando una *varilla metálica* entre sus ramas.

El estudio de las vibraciones rápidas sólo puede efectuarse por el

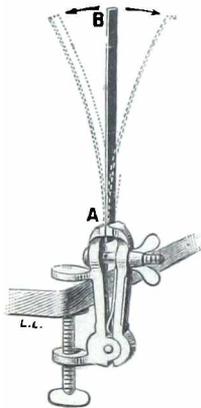


Fig. 373.

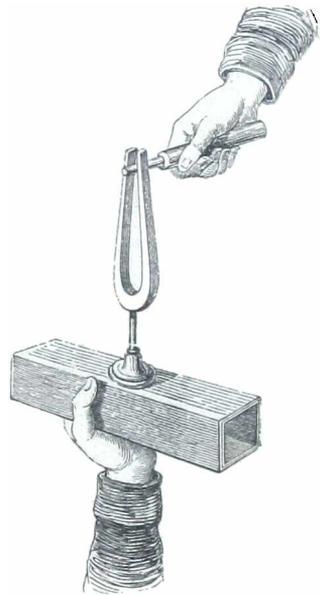


Fig. 374.

método de inscripción gráfica, que, por otra parte, puede emplearse también para las oscilaciones lentas (de los péndulos o de las láminas elásticas largas y delgadas).

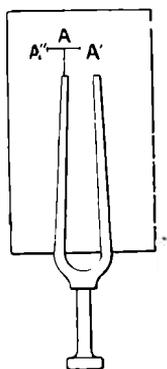


Fig. 375.

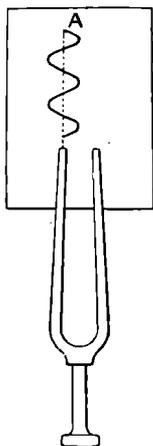


Fig. 376.

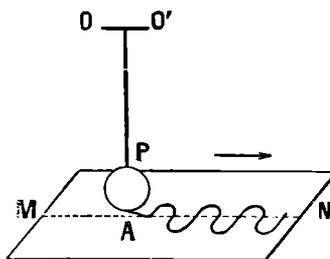


Fig. 377.

negro de humo, de tal manera que el estilo la despinte, en sus oscilaciones. El extremo del estilo oscilará entre los puntos A' y A'' . Pero, si se mueve la placa con movimiento uniforme, perpendicularmente a $A'A''$, el estilo A trazará una curva sinuosa (fig. 376). De este modo, habrása

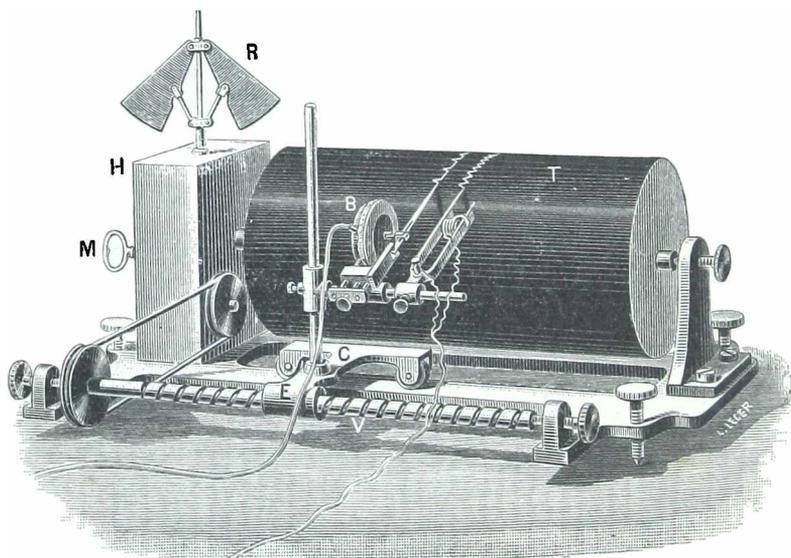


Fig. 378.

inscrito en la placa el movimiento vibratorio de la lámina o del diapasón.

Asimismo, se concibe que se podrá inscribir el movimiento oscilatorio de un péndulo P (fig. 377) móvil alrededor de un eje horizontal OO' , adaptándole un estilo A y moviendo, debajo de él, con movimiento uniforme, una placa de vidrio ahumada MN .

Cronógrafo registrador. — Es difícil comunicar a una placa un movimiento de traslación muy uniforme. Por otra parte, por medio de la disposición anterior, la inscripción del movimiento no podría verificarse durante mucho tiempo, pues, para esto, la placa debería ser demasiado grande.

En consecuencia, en el estudio de los movimientos, se reemplaza siempre la placa de cristal por un cilindro T (fig. 378) cubierto por una hoja de papel liso impregnada de negro de humo. Este cilindro da vueltas por medio de un movimiento de relojería H. El movimiento se hace uniforme merced a unas aspas R, movidas por el mismo mecanismo y que giran rápidamente en el aire. El cuerpo cuyo movimiento se registra puede colocarse en una corredera C, que arrastra un tornillo accionado por el movimiento de relojería. La inscripción se efectúa según una hélice y puede durar mucho tiempo. Este aparato se denomina *cronógrafo registrador*.

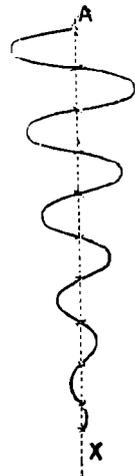


Fig. 380.

391. Naturaleza del movimiento vibratorio de una lámina o de un diapasón. — Si se examina

la curva inscrita por una lámina o un diapasón, después de desenrollar la hoja del cronógrafo, se ve, en primer lugar, que aquella corta a la recta AX (fig. 379), que describe el estilo cuando el cuerpo permanece en reposo, en dos puntos perfectamente equidistantes, si el movimiento del cilindro ha sido muy uniforme. De ahí se deduce, evidentemente, que las oscilaciones son isócronas. El isocronismo persiste si las vibraciones disminuyen de amplitud, a causa de las pérdidas inevitables de energía (fig. 380).

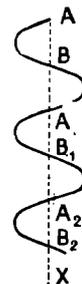


Fig. 379.

Además, la comparación de la curva inscrita por una lámina con la inscrita por un péndulo, demuestra, entre estas dos curvas, una analogía completa. Puede superponerse una sobre otra, siempre que las abscisas y ordenadas se multipliquen por factores a propósito. Ambas curvas son sinusoides.

El movimiento de una lámina vibrante es, pues, lo mismo que el movimiento de un péndulo que efectúe pequeñas oscilaciones, un movimiento *oscilatorio simple*, llamado también *movimiento pendular* o *movimiento sinusoidal*.

OBSERVACIÓN. — Este resultado podía preverse *a priori*. En efecto, sabemos que cuando se dobla una lámina elástica nace una reacción proporcional a la flexión (28). El movimiento de la lámina bajo la influencia de esta fuerza no puede ser sino un movimiento oscilatorio simple (107).

392. Ecuación del movimiento vibratorio. — Fase. — Sean M (fig. 381) la posición, en el tiempo t , de un punto del cuerpo vibrante; A, su posición de equilibrio; A'A'', sus posiciones extremas, simétricas con relación a A : llámase *elongación* del punto vibrante en el tiempo t ,

a la distancia AM del punto a su posición de equilibrio A; *amplitud* a del movimiento, a la distancia AA' de la posición de equilibrio a una de las dos posiciones extremas; *período* T del movimiento vibratorio, al intervalo de tiempo que separa dos pasos sucesivos del punto vibrante a la misma posición (que puede ser cualquiera), *caminando en el mismo sentido*. A

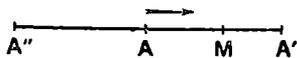


Fig. 381.

menudo, se llama *vibración simple*, al paso del punto vibrante, ya de A'' a A', ya de A' a A''. La duración de una vibración simple es un *semi-período*.

Lámase *frecuencia* de un movimiento vibratorio el número de períodos por segundo. Si el período es T , es evidente que la frecuencia será $N = \frac{1}{T}$.

Si se cuenta s positivamente en el sentido A''A' y se toma como origen de tiempo un instante en que M pase por el punto A caminando en sentido positivo, se obtendrá s , en función del tiempo, por la ecuación de las elongaciones

$$[1] \quad s = a \operatorname{sen.} 2\pi \frac{t}{T}.$$

que es la *ecuación de los espacios* en el movimiento oscilatorio simple (107).

OBSERVACIÓN. — Si, como origen del tiempo, se tomase un momento en que el punto vibrante estuviese en A', la ecuación del movimiento sería

$$s = a \operatorname{cos.} 2\pi \frac{t}{T}.$$

Fase de un movimiento vibratorio. — Dos puntos vibrantes pueden tener el mismo período de vibración, denominándose, en este caso,

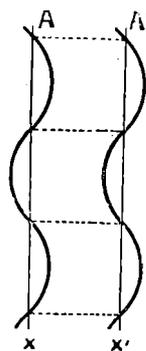


Fig. 382.

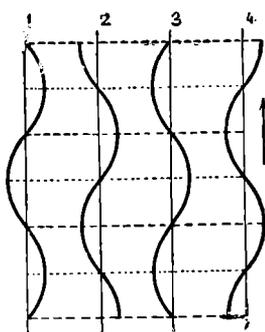


Fig. 383.

síncronos. Si los dos pasan al mismo tiempo por su posición de equilibrio, caminando en igual sentido, alcanzan también al mismo tiempo sus posiciones extremas: entonces, dicese que se hallan, en cualquier momento, en la misma *fase* de su movimiento. De lo contrario, dicese que presentan entre sí *diferencia de fase*. Supongamos, por ejemplo, varios cuerpos vibrantes, del mismo período vibratorio, que inscriben sus movi-

mientos en el mismo cilindro, estando los estilos inscriptores colocados en la misma generatriz del cilindro. La figura 382 representa las inscripciones de dos movimientos que no ofrecen diferencias de fase. En la figura 383, en 2, 3 y 4, se ven las inscripciones de movimientos que tienen diferencias de fase con el movimiento 1.

Cuando dos puntos vibrantes ofrecen diferencia de fase, dicese tam-

bién que uno presenta *avance* o *retraso* sobre el otro. Suponiendo que el movimiento del cilindro se verifica en el sentido de la flecha (fig. 383), se ve que el movimiento 2 se halla en retraso de un cuarto de período sobre el movimiento 1. Pero también puede decirse, que tiene un avance de tres cuartos de período sobre el movimiento 1. Obsérvase igualmente que el movimiento 3 presenta, sobre el 1, un avance o un retraso de un semiperíodo, y que el movimiento 4 tiene un retraso de tres cuartos de período sobre el 1, o un avance de un cuarto de período.

OBSERVACION. — 1ª. Los movimientos 1 y 3 se dice que están *en oposición de fase* porque, en cualquier momento, sus elongaciones y velocidades son de sentidos contrarios.

2ª. A un avance o retraso de un período o de un número entero de períodos no corresponde ninguna diferencia de fase.

Ecuaciones de dos movimientos vibratorios sincronos que presentan una diferencia de fase.
— Llamemos, en general, θ al retraso que un movimiento 2 presenta sobre el movimiento 1, y sea la ecuación del movimiento 1.

$$s = a \operatorname{seno} 2\pi \frac{t}{T}.$$

Mientras que el primer punto vibrante pasa a su posición de equilibrio, en el tiempo cero, el segundo pasa también, en el mismo sentido, en el tiempo θ . En el tiempo t , el segundo punto vibrante pasa, pues, a su posición de equilibrio desde el tiempo $t - \theta$. Por lo tanto la ecuación de su movimiento es

$$s' = a' \operatorname{seno} 2\pi \frac{t - \theta}{T};$$

llamando a' a su amplitud.

393. Energía vibratoria. — Sea una lámina elástica cuya posición de equilibrio es OA (fig. 384). Llevémosla a A'; para esto se debe efectuar un trabajo contra la fuerza elástica, lo cual aumenta la energía potencial de la lámina. Si dejamos libre la lámina, entonces obedece a las fuerzas elásticas, las cuales desempeñan un trabajo motor en el trayecto de A' a A; por consiguiente aumenta la velocidad. Al mismo tiempo la energía potencial de la lámina disminuye; pero es reemplazada por una cantidad igual de energía cinética. Mas la lámina rebasa su posición de equilibrio; las fuerzas elásticas efectúan un trabajo resistente, la velocidad disminuye y, al mismo tiempo, la energía cinética, mientras que aumenta la energía potencial. En A'' la energía se halla de nuevo entera en forma potencial. Si la lámina no perdiera energía, oscilaría indefinidamente entre A' y A'', conservando la misma cantidad total de energía. En cualquier punto de su trayecto, la suma de la energía cinética y la energía potencial sería constante. Esta energía total se denomina *energía vibratoria*.

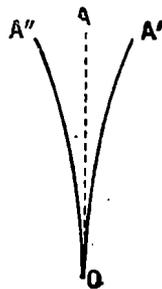


Fig. 384.

En realidad, la lámina pierde gradualmente energía, a causa de la resistencia del aire y del impulso del soporte. De donde resulta que las oscilaciones disminuyen gradualmente de amplitud.

Expresiones de la energía vibratoria de un punto material animado de movimiento osci-

latorio simple. — Para un punto material de masa m , animado por un movimiento oscilatorio la ecuación de la elongación s es :

$$s = a \operatorname{sen}. 2\pi \frac{t}{T}.$$

La velocidad vibratoria v del punto, en el tiempo t , se obtiene por la derivada de la elongación con relación al tiempo. Luego

$$v = \frac{ds}{dt} = \frac{2\pi a}{T} \cos. 2\pi \frac{t}{T}.$$

El valor máximo de esta velocidad es, en valor absoluto,

$$V = \frac{2\pi a}{T},$$

que es la velocidad en el momento en que el punto pasa por su posición de equilibrio (en el tiempo $t = 0$, por ejemplo). En este momento, toda la energía está bajo forma de energía cinética : su expresión es $\frac{1}{2}mV^2$. Luego la energía vibratoria del punto material tiene un valor :

$$E = \frac{1}{2}mV^2 = \frac{2\pi^2 a^2 m}{T^2}.$$

Cualquier cuerpo vibrante está formado de un conjunto de puntos materiales ; la energía vibratoria total es igual a la suma de las energías vibratorias de los puntos. Escríbese :

$$E = \Sigma \frac{2\pi^2 a^2 m}{T^2}.$$

394. Movimientos vibratorios compuestos. — Pongamos en vibración una lámina elástica, no ya apartándola de su posición de equilibrio y abandonándola a sí misma ; sino produciendo percusión en un punto

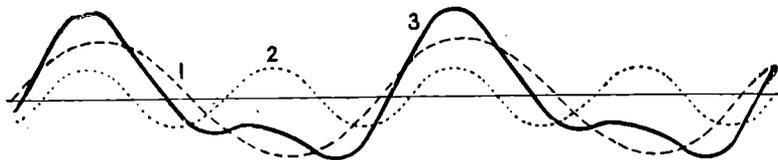


Fig. 385.

más a menos separado de sus extremos. Inscribamos sus oscilaciones. Notaremos que la *curva inscrita no es ya un senoide*. Esta curva sigue siendo *periódica*, es decir, que se reproduce idéntica a sí misma, por intervalos de tiempos iguales al período (como la curva 3, fig. 385).

La mayoría de cuerpos vibrantes cuando se inscribe su movimiento, da, así, curvas periódicas más o menos sinusoidales. Sus movimientos se llaman *movimientos oscilatorios compuestos*.

Ecuación de un movimiento vibratorio compuesto. — Fórmula de Fourier. — La elongación de un punto animado de un movimiento oscilatorio compuesto no está ya representada por una función sinusoidal simple tal como la ecuación [1] ; sino por una función periódica (*) $s = f(t)$ más o menos compleja.

Fourier ha demostrado que toda función periódica de período T puede descomponerse en una suma algébrica de funciones sinusoidales, una de las cuales tiene por período T , mientras que las demás tienen períodos $\frac{T}{2}, \frac{T}{3}, \dots$. La elongación s de un punto de un

* Llámase función periódica de una variable t una función $f(t)$ que toma valores iguales para un valor t cualquiera de la variable y para los valores $t, t + T, t + 2T, \dots, t + kT$ (siendo k un número entero) ; T es el período de la función.

cuerpo vibrante cualquiera es, en el caso más general, dada por una expresión de la forma

$$s = a \operatorname{sen.} 2\pi \frac{t - \theta_1}{1} + a_1 \operatorname{sen.} 2\pi \frac{t - \theta_1}{2} + a_2 \operatorname{sen.} 2\pi \frac{t - \theta_2}{3} + \dots$$

Esto resultado matemático se enuncia así:

Un movimiento vibratorio cualquiera puede descomponerse siempre en movimientos vibratorios sinusoidales; siendo la elongación, en el movimiento real, la suma algebraica de las elongaciones de los movimientos sinusoidales.

Ejemplo bien sencillo tenemos en la figura 385. Las ordenadas de la curva periódica 3, que no es sinusoidal, se obtienen sumando algebricamente las ordenadas de las sinusoides 1 y 2, una de las cuales tiene el mismo período que la curva 3, y la otra, un período dos veces más corto.

Se concibe, pues, que los movimientos vibratorios no sinusoidales lleven también el nombre de *movimientos vibratorios compuestos*.

395. Aplicaciones generales del método gráfico. — El método de inscripción gráfico préstase igualmente al estudio de movimientos muy variados. Ya lo hemos encontrado en el estudio de la caída de los cuerpos, en el barómetro, el manómetro, el termómetro y el higrómetro registradores. En general, puede servir para estudiar cuantos fenómenos varíen en función del tiempo. En particular, ha recibido importantes aplicaciones en fisiología. Marey, en experimentos notables, lo ha aplicado al estudio del funcionamiento de diversos órganos (movimientos del corazón, contracciones musculares, etc.).

Ampolla de Marey. — Pero, en la mayoría de los casos, no se puede inscribir directamente el movimiento de un cuerpo por medio de un estilo que se fije en él. Es preciso transmitir al estilo inscriptor el movimiento del cuerpo que se quiere estudiar. Para esto, se emplea diversos mecanismos, entre los cuales, uno de los más prácticos es la *ampolla de Marey*. Consta de un pequeño tambor de latón B (fig. 378) cerrado por una membrana de caucho. Un disco de aluminio, fijo en esta membrana, transmite los movimientos de ella al estilo. Por medio de un mecanismo que representa la figura, el extremo del estilo reproduce todos los movimientos de la membrana, amplificándolos. El tambor B comunica, por un tubo de goma, con una segunda caja (no representada en la figura) cerrada por una membrana que se apoya contra el cuerpo cuyo movimiento se quiere estudiar. El conjunto de las dos cajas y el tubo contiene aire a una presión algo superior a la presión atmosférica, lo que infla un poco las membranas. Los movimientos que, en estas condiciones, el cuerpo estudiado comunica a la membrana aplicada contra él son transmitidos fielmente por el aire a la membrana B y el estilo los registra en el tambor.

Inscripción del tiempo. — Para conocer perfectamente un movimiento, es preciso saber el tiempo que duran sus diversas fases. Esto se consigue inscribiendo en el cilindro las oscilaciones de un péndulo de segundos. Pueden emplearse varios medios. Por ejemplo, la varilla del péndulo, que es metálica, lleva un vástago metálico curvo *t* (fig. 434) que se introduce en un depósito de mercurio M, durante una semioscilación del péndulo y sale durante la oscilación siguiente, y así sucesivamente. Por otra parte, en el extremo de la palanca *s o a*, móvil alrededor de un eje *o* y cuyo otro extremo contiene la armadura *a* de un electroimán E, hay un estilo registrador *s*. La armadura se mantiene separada de los polos del electroimán por un resorte *r*. Los extremos del hilo del electroimán comunican, uno, con el polo de una pila *p*, el otro con el mercurio M y el segundo polo de la pila comunica con la varilla del péndulo. Se ve que, durante una semioscilación de péndulo se cierra el circuito y la armadura es atraída por el electroimán, en tanto que, en la semioscilación siguiente, el resorte antagonista la conduce hacia atrás. El estilo describe, pues, una línea A A' A"... (fig. 386), y si se trazan las generatrices AB, A'B', A''B'', se verá que éstas se suceden ante el estilo registrador, en intervalos de tiempo iguales a un período de oscilación del péndulo.

Si, por otra parte, al mismo tiempo que las oscilaciones de un péndulo, se inscribe el movimiento de otro cuerpo, de una lámina vibrante, por ejemplo, se podrá, comparando ambas inscripciones, deducir exactamente el movimiento del cuerpo en función del tiempo. Y, en una lámina vibrante, se podrá saber el número de vibraciones que produce por segundo.

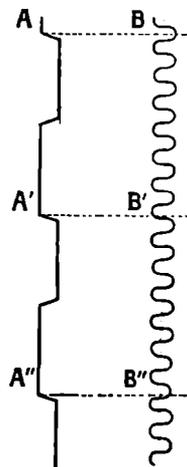


Fig. 386.

Para estudiar movimientos rápidos, puede reemplazarse la inscripción del péndulo por la de una placa vibrante o de un diapasón en que se conoce la duración de las oscilaciones.

Para esto, es más cómodo emplear un diapasón cuyo movimiento es mantenido *eléctricamente* por un mecanismo idéntico, en absoluto, al de los timbres eléctricos.

396. Cronofotografía. — La cronofotografía tiene por objeto el estudio de los movimientos que no pueden ser inscritos por el método precedente, tales como los movimientos de los seres animados. El método cronofotográfico consiste en tomar fotografías sucesivas, a intervalos regulares, del sujeto en movimiento. Esto se consigue poniendo delante del objetivo del aparato fotográfico un obturador compuesto de un disco metálico, con una abertura en forma de sector y que gira delante del objetivo. Si la placa (o la película fotográfica) está fija, las imágenes sucesivas así obtenidas del objeto en movimiento, pueden superponerse en parte. En los cinematógrafos (397), que son aparatos cronofotográficos, el mecanismo que hace girar el disco mantiene fija la película mientras está descubierto el objetivo, pero cuando está cerrado la hace avanzar la longitud de una imagen. De este modo están separadas completamente la imágenes sucesivas.

Marey empleó el método cronofotográfico para estudiar la marcha, el salto, la carrera, el vuelo de las aves, el nadar de los peces, etc. También pudo aplicar su método para registrar fenómenos fisiológicos: circulación de la sangre en los vasos, movimientos del corazón; así como para estudiar los movimientos vibratorios de los líquidos, etc.

Asimismo, valiéndose de aparatos especiales, el general Sebert ha estudiado diversas cuestiones de balística (disparo de torpedos, etc).

Cronofotografía por las llamas vibrantes. — *Experimentos de Benoist.* — Cuando se enciende un gas combustible en el extremo de un mechero *a*

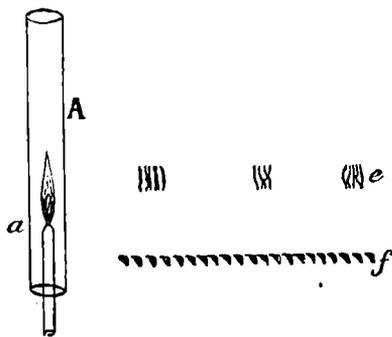


Fig. 387.

colocado en un tubo vertical *A* (fig. 387), se oye un ruido*, el cual proviene de que la llama, arrastrada por la corriente de aire ascendente que hay en el tubo, se apaga y se enciende sucesivamente, con un período determinado por las dimensiones del tubo *A* que hace veces de tubo sonoro (445). M. Benoist ha tenido la idea de utilizar para la cronofotografía una llama muy brillante de acetileno vibrando en esas condiciones. En este caso el mechero comunica, sea con un gasómetro pequeño

que contenga acetileno bajo presión conveniente, sea simplemente con una lámpara ordinaria de acetileno. Si se mira la llama con un aparato fotográfico y si a éste se le hace girar sobre su soporte, se ve en la placa, después del desarrollo, una serie de imágenes de la llama (*f*, fig. 387).

* Este experimento, hecho con hidrógeno, se conocía antes con el nombre de *armónica química*.

Si al mismo tiempo se ha fotografiado un fenómeno cualquiera, la comparación de las dos imágenes da la duración de ese fenómeno. Así se ve en *e* la fotografía de una serie de chispas eléctricas emitidas por un carrete de inducción, con un condensador en derivación; las llamas *f* se sucedían con un intervalo de $\frac{1^s}{500}$ (número conocido según la altura del sonido). Se ve, pues, que las chispas se sucedían a intervalos iguales a $\frac{8^s}{500}$ (62,5 por seguido) estando formada cada una de cinco chispas.

M. Benoist ha utilizado también su método para medir la duración de la apertura de los obturadores fotográficos. Para esto basta mover el aparato delante de la llama durante el juego del obturador, y contar el número de imágenes que resultan en la placa.

397. **Síntesis del movimiento : cinematógrafo.** — El problema de la síntesis de los movimientos tiene por objeto reproducir, para la vista de un observador, los movimientos más diversos. Plateau le había ya bosquejado por el *zootropio* y el *fenakistiscopio*, y luego quedó resuelto completamente por el *kinetoscopio* de Edison, y casi simultáneamente con el *cinematógrafo* de los hermanos Lumière y el cronofotógrafo de Demeny.

Principio. El efecto producido por estos aparatos es una consecuencia fisiológica de la persistencia de las impresiones luminosas en la retina. Supongamos ahora que se fotografía el cuerpo en movimiento según el método cronofotográfico, por ejemplo tomando 960 pruebas sucesivas por minuto, es decir las posiciones sucesivas de las partes del objeto en movimiento a $\frac{1}{16}$ de segundo de intervalo. Numeremos estas pruebas 1, 2, 3, etc. Miremos la prueba nº 1 y eclipsemos después esta prueba el tiempo más corto posible; durante $\frac{1}{45}$ de segundo; entonces, continuaremos viendo la prueba durante el eclipse y un poco después. Si se aprovecha el instante del eclipse para substituir la prueba nº 2, se verá al mismo tiempo, primero el nº 1 por persistencia, y después la prueba nº 2 por la impresión directa. Y, como las partes inmóviles están en coincidencia y la impresión del nº 1 está ya debilitada, el ojo recibirá exactamente la sensación de sucesión de la actitud nº 2 a la actitud nº 1. Si se continúa haciendo las sustituciones sucesivas de diversos números, el ojo percibirá la serie de actitudes sucesivas y, de este modo, quedará realizada la síntesis del movimiento. Para que la reproducción del movimiento sea fiel, es preciso que el ritmo de las substituciones sucesivas sea idéntico al ritmo de las exposiciones sucesivas.

En la mayor parte de los cinematógrafos, se emplea la linterna eléctrica para proyectar las pruebas sobre una pantalla y, de este modo, son más visibles para un grupo de espectadores y pueden reproducirse los movimientos con toda su naturalidad, si el cristal de aumento es regular.

Cinematógrafo Gaumont. — Para tomar una prueba negativa fotográfica, hay que servirse de una película flexible llamada *film*, llena de agujeros equidistantes en sus bordes, de longitud variable, que puede

llegar hasta 200 o 300 metros, y de 35 milímetros de ancho. Esta peli-

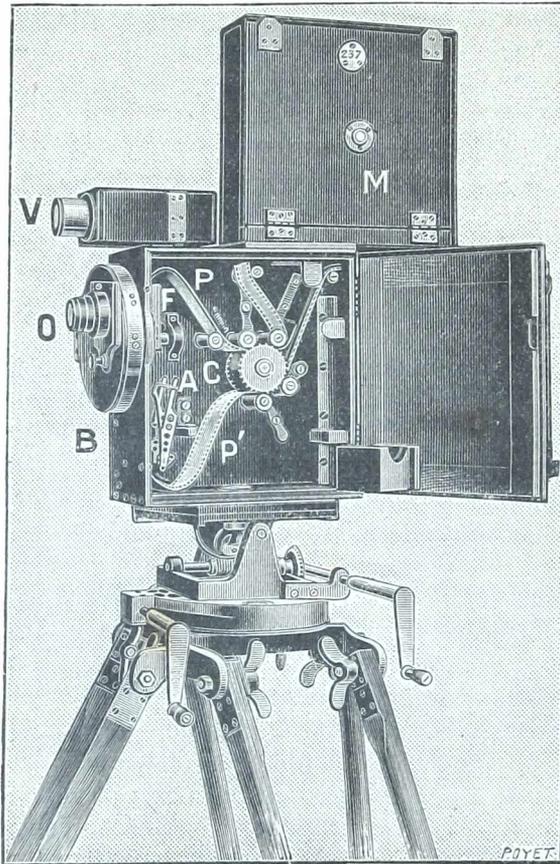


Fig. 388.

cula, que sale de la caja superior. M (fig. 388) es arrastrada con movimiento uniforme por un cilindro dentado C, cuyos dientes engranan en los agujeros de la película. Esta entra en un bastidor que tiene una ventana. El mecanismo del aparato pone en juego unos ganchitos que hacen bajar la película, en tiempo muy corto, cuando el obturador cubre el objetivo. Al salir del bastidor, la película es arrastrada de nuevo, con movimiento continuo, por el cilindro dentado C, para ir a enrollarse en la caja que está detrás.

El objetivo O forma la imagen en la ventana y por consiguiente en la película*. Este queda abierto mientras no se mueve la película; pero el obturador intercepta la luz durante el movimiento de la película. Todos estos mo-

vimientos obedecen a la acción de un manubrio.

La película impresionada se revela, se fija y se seca, y, en seguida, se tiran las pruebas positivas que luego se pueden proyectar con el mismo aparato. Para esto, no hay más que iluminar por detrás la ventana con una linterna de proyección, y el objetivo O da, en una pantalla blanca, más o menos lejos, la imagen aumentada de los objetos, que, por el movimiento del aparato, van a fijarse en la ventana.

Generalmente, el aparato que sirve para la proyección no es el mismo que ha servido para tomar las fotografías. Consta de las mismas piezas esenciales: mecanismo que arrastra el *film*, obturador giratorio, objetivo; pero como el *film* no necesita ser protegido contra la luz, esas piezas están en una caja abierta.

* Para estar seguro de que la imagen del sujeto se forma bien en la película, el aparato tiene un *mirador* V que forma en un vidrio visible una imagen semejante a la que da el objetivo O en la ventana.

Aplicación para la enseñanza por la vista. — El Dr Doyen ha indicado una aplicación muy interesante de este aparato para la enseñanza de la cirugía. Y en efecto, permite reproducir en un curso las diversas fases de una operación hecha por un operador hábil, y eso tantas veces como se quiera. Además, esta aplicación puede extenderse a otras varias enseñanzas.

Microcinematografía. — Reemplazando el objetivo ordinario de un cinematógrafo, por un microscopio que dé una imagen real muy grande, se ha conseguido registrar y estudiar los movimientos de los seres microscópicos, los fenómenos celulares, los movimientos brownianos, etc.

Cinematógrafo Dussaud para ciegos. — Aquí podemos hablar de un ingenioso aparato imaginado recientemente por M. Dussaud, para comunicar a los ciegos las sensaciones de objetos en movimiento, operando la síntesis del movimiento por el tacto : por tanto debe incluirse en la categoría de los cinematógrafos. Este aparato hace pasar por debajo de los dedos de los ciegos los relieve que representan un mismo objeto en las fases sucesivas de su movimiento. La ilusión es completa y ha permitido revelar a los ciegos nociones inaccesibles para ellos : caballo que galopa, máquina en movimiento, marcha de los astros en el cielo, etc. Dussaud ha estudiado el tiempo necesario para la percepción táctil y su duración, y ha encontrado que estas magnitudes son más largas que para la percepción visual.

398. **Método estroboscópico.** — El método estroboscópico está fundado en un principio contiguo al de la cronofotografía; pero no se aplica más que a los movimientos periódicos. El ejemplo siguiente hará comprender el principio de este método.

Supongamos que una rueda de radios idénticos y equidistantes da vueltas con velocidad uniforme, tal que un radio emplea un tiempo T en suceder al precedente en un mismo punto del espacio. Iluminemos la rueda con resplandores sucesivos, producidos a intervalos de tiempo regulares y que cada uno dure muy poco. Para esto, basta proyectar, por medio de una lente L (fig. 389), un haz luminoso sobre un disco d , perforado por orificios equidistantes y al que un motor cualquiera (por ejemplo, un motor eléctrico) hace girar con un movimiento de rotación uniforme, y colocar la rueda en la luz intermitente que atraviesa al disco.

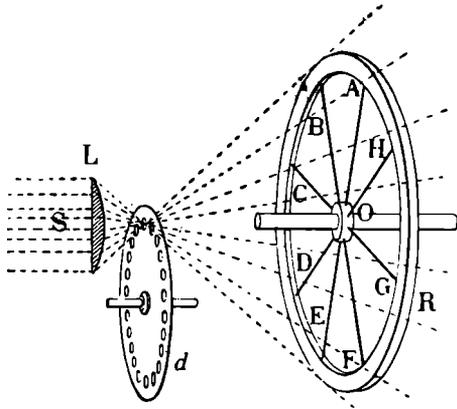


Fig. 389.

Supongamos primero el periodo de resplandor igual a T . El observador, durante un resplandor, verá un radio OA , en un punto dado; al resplandor siguiente, verá un radio OB , que sucede al primero, y al cual es idéntico. Al resplandor que siga, verá, en el puesto de OA , el radio OC , y así sucesivamente. Si el periodo de resplandores es un poco mayor que T , en el segundo resplandor, el radio OB se encontrará algo más lejos que OA ; y así sucesivamente, a cada resplandor; el observador verá rodar la rueda en el sentido de su rotación real, y tanto más lentamente cuanto más se acerque a T el periodo de los resplandores. Si, por el contrario, este periodo es un poco más pequeño que T el radio OB estará, al segundo resplandor, un poco menos lejos que OA , y así sucesivamente; en este caso, el observador creará que la rueda gira en sentido inverso al de su verdadera rotación.

Del mismo modo, si se ilumina un cuerpo vibrante, un diapasón, por ejemplo, por una sucesión de resplandores cuyo periodo sea exactamente el mismo que el suyo propio, se le verá inmóvil. Por el contrario, si el periodo de los resplandores es algo mayor o algo menor que su periodo vibratorio, se verá que se mueve lentamente. De este modo, se podrá observar al cuerpo vibrante en todas las fases de su movimiento, como si este movimiento hubiera sido realmente aminorado.

Inversamente, como el movimiento de un diapasón es en absoluto periódico puede

servir para producir resplandores rigurosamente equidistantes*, que permitirán estudiar otro fenómeno periódico, realizar, por ejemplo, una de las aplicaciones más importantes de la estroboscopia, el registro de la constancia de la velocidad de rotación de un eje. Basta proveer a este eje de un disco en el que se trazan figuras equidistantes (sectores negros, por ejemplo) e iluminarlo con resplandores periódicos; si se ve al disco inmóvil, puede asegurarse que su movimiento es uniforme y se puede determinar su velocidad, conociendo el período de los resplandores y el número de figuras del disco. Si éste no parece inmóvil, el sentido de su movimiento aparente indica si se debe acelerar o retardar su movimiento para alcanzar la velocidad deseada.

La estroboscopia se realiza muy bien con el mecanismo de llama vibrante de M. Benoist. La llama alumbró el cuerpo en rotación de una manera intermitente y reemplaza a la vez la linterna de proyección *L* y el disco *d*.

CAPÍTULO II

PRODUCCIÓN Y CUALIDADES DE LOS SONIDOS

399. **Objeto de la acústica. — Sonidos y ruidos.** — La *acústica* tiene por objeto el estudio de los sonidos. Nuestro sentido del oído percibe en un sonido tres cualidades: la *intensidad*, la *altura* y el *timbre*. Si oímos sucesivamente dos sonidos, inmediatamente podemos distinguir el más fuerte, o dicho de otro modo, el más *intenso*. Además, estos dos sonidos pueden diferenciarse en la *altura*, pareciendo uno más o menos *agudo* que el otro. A los sonidos agudos se les llama generalmente *altos*, y a los graves, *bajos*. En fin, si dos sonidos de la misma altura son producidos por dos instrumentos diferentes, por ejemplo por una flauta y un violín, el oído podrá distinguirlos claramente. El *timbre* es la cualidad en que se distinguen estos dos sonidos.

También hay que distinguir el sonido del ruido. Este carece de los caracteres de *altura* y de *timbre*. El ruido es, bien un sonido muy corto, bien una mezcla confusa de varios sonidos. Sin embargo, la diferencia entre el sonido y el ruido no es absoluta. Si un ruido aislado como el de la caída de un pedazo de madera, no presenta el carácter de altura, una sucesión de ruidos análogos puede descubrir ese carácter. Así, por ejemplo, si se deja caer una después de otra una serie de siete tablitas delgadas de pino, de dimensiones adecuadas, se puede tener la impresión de las siete notas de la gama. En acústica, vamos a estudiar la causa del sonido y sus propiedades, así como su propagación en los diferentes medios.

400. **Movimiento vibratorio de los cuerpos sonoros.** — Todo cuerpo que suena está en estado de *movimiento vibratorio*, como se puede probar fácilmente. Si se pulsa una cuerda tensa, un poco larga, sus vibraciones

* Para esto, basta colocar en ambas ramas del diapasón dos placas perforadas con hendiduras paralelas, situadas una frente a otra, al hallarse el instrumento en su posición de equilibrio. Cuando el diapasón vibra, la luz puede pasar, una vez por cada vibración *simple*, a través del sistema de las dos hendiduras.

son aparentes a la vista. Del mismo modo, si tomamos con una **mano**, una campana de vidrio que contenga un pedacito de metal (fig. 390) y le damos con la otra un golpe seco, sus paredes resuenan y se ponen a vibrar. En efecto, el metal recibe de las paredes vibrantes pequeños y repetidos choques, que resultan de un movimiento de trepidación más o menos vivo, acompañado de un ruido seco particular. Colocando la mano sobre las paredes de la campana, se apagan las vibraciones y los choques.

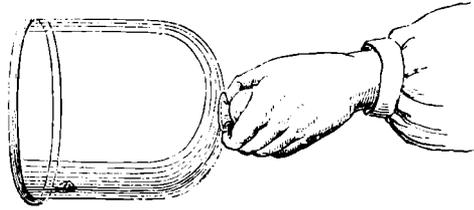


Fig. 390.

Los líquidos pueden también emitir sonidos; que es lo que sucede, generalmente, cuando se abre un grifo en una cañería de agua. Se oye un sonido musical más o menos prolongado, debido a las vibraciones de la columna líquida.

Los gases producen igualmente sonidos por sus vibraciones; que es el caso de los tubos sonoros.

Si el movimiento del cuerpo sonoro es periódico, el sonido tiene un carácter preciso de altura.

Se demuestra inscribiendo el movimiento en un cilindro registrador. Los sonidos dan curvas periódicas; los ruidos, no periódicas.

Pero no todo cuerpo vibrante es capaz de proporcionarnos sensación sonora. Para ello, es necesario que la frecuencia de las vibraciones sea cuando menos igual a 16 vibraciones completas por segundo.

Asimismo, si la frecuencia es muy grande, se deja de percibir sensación sonora. Esto se demuestra con el *silbato de Galton*, en el cual se insufla aire y se le puede encoger progresivamente; entonces produce un sonido cada vez más agudo. Al llegar a cierta longitud, se deja de oír el sonido, a pesar de que las vibraciones continúan. Por otra parte, el límite de altura del sonido perceptible no es el mismo para todos los individuos. Hay quienes perciben hasta una frecuencia igual a 50 000. Además, Kœning ha podido producir vibraciones de una frecuencia de 90 000 con pequeños diapasones; Altberg ha obtenido 340 000 con chispas eléctricas.

401. Causa de la intensidad de un sonido. — Si se hace vibrar un diapason, se nota que la intensidad del sonido decrece progresivamente y acaba por apagarse del todo. Es fácil darse cuenta de que al mismo tiempo disminuye la amplitud de las vibraciones del cuerpo sonoro y acaba por anularse. La intensidad del sonido emitido por un cuerpo sonoro dado es, pues, tanto más grande cuanto mayor es la amplitud de las vibraciones del cuerpo.

402. Causa de la altura de un sonido. — *La altura del sonido producido por un cuerpo sonoro está determinada por la frecuencia del movimiento vibratorio de este cuerpo; los sonidos más agudos son los que tienen mayor frecuencia.* Esto se demuestra inscribiendo al mismo tiempo, en el mismo cilindro registrador, los movimientos de dos cuerpos sonoros, dos diapasones, por ejemplo, que emitan sonidos de altura diferente.

Examinando las inscripciones (fig. 391), se reconoce inmediatamente que el número de vibraciones del sonido más bajo es, en un tiempo dado, más pequeño que el del sonido más alto.

Por lo tanto, mediremos la altura de un sonido por el número que representa la frecuencia de su movimiento vibratorio.

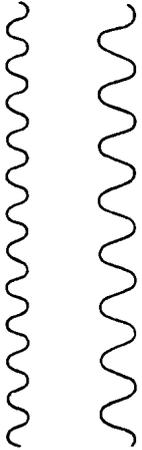


Fig. 391.

403. **Causa del timbre.** — Si se inscriben los movimientos vibratorios de dos cuerpos sonoros que emiten

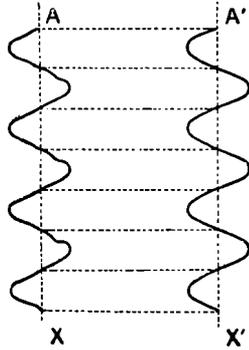


Fig. 392.

sonidos de igual altura, pero de distinto timbre, se hallan dos curvas del mismo periodo, *pero de forma diferente* (fig. 392). Por lo tanto, el timbre de un sonido está en relación con la ley que, en función del tiempo, siguen las elongaciones de los puntos del cuerpo sonoro.

También podemos decir que el timbre de un sonido proviene de que no es simple; puesto que la vibración del cuerpo sonoro que la emite puede descomponerse en

varias vibraciones simples (394). Y dos sonidos que tengan la misma altura, pero timbre distinto, difieren por las vibraciones simples que componen la vibración del cuerpo. Más adelante (450), estudiaremos los procedimientos físicos que permiten distinguir los sonidos simples que constituyen un sonido compuesto.

404. **Reproducción de los sonidos.** — **Fonógrafos.** — Los fonógrafos son aparatos que permiten no sólo inscribir las vibraciones de un cuerpo sonoro, sino también reproducir, luego, el sonido con todas sus cualidades, por medio de la curva inscrita. Todos los fonógrafos son perfeccionamientos del primer fonógrafo inventado por Edison*.

Edison ha perfeccionado en alto grado el fonógrafo. El suyo perfeccionado es una maravilla de perfección mecánica. Compónese de un cilindro de cera m ó m' (fig. 393) de unos 12 cm. de longitud por 5 de diámetro, montado en un eje cc' , provisto de un tornillo V cuyo paso de rosca era un cuarto de milímetro. Este tornillo es movido por un motor eléctrico encerrado en la caja E_1 . Además, en $FR JW$, se ve un regulador de velocidad y los órganos de transmisión.

Para inscribir una serie de sonidos se hace apoyar en el cilindro la pieza L'' , representada aparte (fig. 394). Adáptase en E (fig. 394) un tubo P (fig. 393) terminado por un pabellón ante el cual se emiten los

* Antes del descubrimiento de Edison, Ch. Cros había indicado ya el principio del fonógrafo.

** En la figura 393 esta pieza no está representada en la posición correspondiente a la inscripción. En efecto, el fonógrafo está dispuesto para la reproducción, y el *reproductor* K es el que apoya sobre el cilindro. Estos dos órganos pueden sustituirse, como se quiera, uno por otro, haciendo girar la pieza $K A L$ al rededor del eje A .

sonidos. La lámina *m* vibra y comunica sus vibraciones al cuchillo *c* que se apoya contra el cilindro de cera. Cuando éste se halla en rotación, el cuchillo inscribe, en la profundidad de la cera, una curva sinuosa

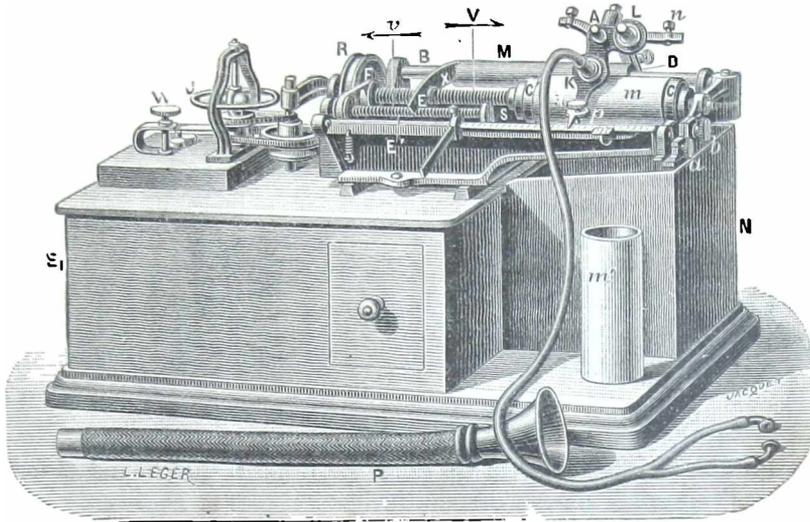


Fig. 393.

que es la inscripción del sonido. Además, la pieza *A* está relacionada con una pieza *MX* que termina en una tuerca *E* que apoya contra el tornillo *V*. De aquí, resulta que a medida que el cilindro da vueltas, el inscriptor se mueve paralelamente a las generatrices, de manera que la inscripción se verifica siguiendo una hélice que puede ser muy larga. Para reproducir el sonido inscrito, se coloca la pieza *KAL* en su posición primitiva y se hace apoyar contra el cilindro el reproductor *K*. Este está construido poco más o menos como es inscriptor, salvo que el disco vibrante *m* (fig. 395) está unido a una punta roma *c* y no a un cuchillo cortante. Si hacemos girar, ahora, el cilindro, como anteriormente, la punta *c* sigue todas las sinuosidades de la inscripción, y comunica a la placa *m* un movimiento vibratorio que es evidentemente idéntico al que ha determinado la inscripción.

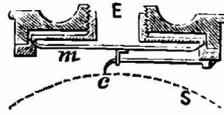


Fig. 394.

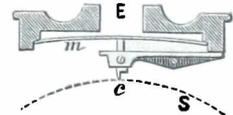


Fig. 395.

Para oír mejor el sonido reproducido de este modo, en el fonógrafo Edison (fig. 395) adaptábase en *E* un tubo bifurcado (fig. 393) que iba a parar a los oídos del oyente. En los fonógrafos actuales se emplea una gran bocina (como la representada en la figura 396) que permite que oigan el sonido muchas personas a la vez.

El fonógrafo Edison era caro. Se le ha simplificado notablemente y, al mismo tiempo, se han mejorado sus partes esenciales, el inscriptor y el reproductor.

Fonógrafos de disco. — En estos últimos años, los fonógrafos de cilindros se han sustituido por los *fonógrafos de discos*, como el que repre-

sentan las figuras 396 y 397. En estos aparatos, la inscripción se verifica en *espiral*, en un disco, en vez de efectuarse en *hélice* en un cilindro.

En los *fonógrafos Pathé* (fig. 396) la inscripción se hace en el hueco de un surco por medio de un zafiro tallado en cuchillo. Para la reproducción se emplea un zafiro de punta roma S (fig. 397) que por medio de una palanca amplificadora,



Fig. 396.

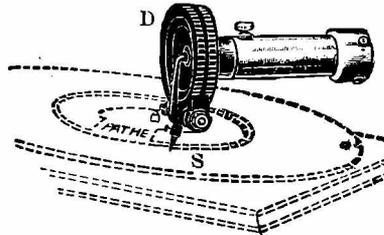


Fig. 397.

transmite sus movimientos a un disco de mica D que forma el fondo de una caja de ebonita puesta en comunicación con la bocina.

En el *gramófono*, la inscripción es lateral, es decir que el estilo vibra horizontalmente, penetrando más o menos en una pared lateral de un surco en espiral; este estilo es una aguja de acero.

Reproducción de los discos. — La inscripción hecha en un disco de cera se puede reproducir cuantas veces se quiera. Para esto se hace conductora de la corriente eléctrica la superficie de ese disco, barnizándola con grafito, y se le aplica una capa de cobre por la *galvanoplastia* (991). En la *matriz* obtenida se comprime una substancia plástica en caliente, que, penetrando en todos los detalles de la matriz, reproduce exactamente el disco primitivo. Al enfriarse, el disco se endurece, y entonces puede servir para gran número de audiciones sin que se use mucho la inscripción.

Aplicaciones del fonógrafo a la enseñanza. — Se ha pensado en aplicar el fonógrafo a la enseñanza de las lenguas vivas, estando hecha la inscripción de las palabras por una persona del país cuya lengua se estudia; el aparato reproduce después una pronunciación correcta. M. Laudenbach ha establecido el método de enseñanza por el fonógrafo, empleando con éxito el *Pathégrafo*. Con este aparato se puede impresionar a la vez el oído y la vista. Para eso, mientras que emite los sonidos, una tira de papel en la que están impresas las palabras pronunciadas, se desenrolla en perfecto sincronismo ante la vista de los espectadores y oyentes; de modo que éstos ven la palabra en el momento, preciso en que la oyen pronunciar. Este procedimiento pedagógico obvia la inferioridad muy frecuente y variable según las personas, sea de la memoria visual, sea de la memoria auditiva solicitadas separadamente.

405. Asociación del cinematógrafo y del fonógrafo. — *Cronófono Gaumont.* — Desde la invención del cinematógrafo, cuando ya existía el fonógrafo, se trató de asociar los dos aparatos, para reproducir a la vez los movimientos y la palabra o el canto. La dificultad del problema estaba en la realización de un sincronismo perfecto entre la marcha de los dos aparatos. M. Gaumont consiguió primero obtener *fono-escenas* por dos registramientos sucesivos. Inscríbese primero en el fonógrafo el canto de un actor, poniéndose éste tan cerca del pabellón como sea necesario para obtener una buena inscripción. Después se coloca el disco obtenido en un aparato reproductor; el cantor, guiado entonces por el

compás del canto reproducido, representa delante del cinematógrafo la escena. Los dos aparatos funcionan luego sincrónicamente, reproduciendo a la vez el canto y los movimientos. Este método sólo podía aplicarse al canto. Desde 1910 M. Gaumont ha conseguido registrar simultáneamente sonidos y movimientos y su reproducción en sincronismo perfecto; y ha dado el nombre de *cronófono* al aparato que emplea. Este se compone de un fonógrafo bastante sensible para registrar los sonidos a varios metros de distancia, y de un cinematógrafo cuyo movimiento está regido por el del fonógrafo. Para esto, los dos aparatos reciben su movimiento de dos pequeños motores eléctricos de corriente continua de la misma potencia, dispuestos en derivación en un mismo generador de corriente. Los inducidos de estos motores están divididos en un mismo número de secciones, y cada sección de uno de los inducidos está ligada a la sección correspondiente del otro. De aquí resulta que uno de los inducidos no puede girar cierta cantidad sin que el otro haga lo mismo.

Para la reproducción, se coloca el fonógrafo cerca de la pantalla donde se proyecta la imagen cinematográfica; el disco del fonógrafo conserva una velocidad constante, igual a la que tenía al registrar el sonido, y el movimiento del cinematógrafo se verifica como dejamos dicho. Esto no obstante puede suceder, por cualquier accidente, que resulte una discordancia de una fracción de segundo entre los dos aparatos; pero entonces un mecanismo sencillo permite adelantar o retrasar la marcha del cinematógrafo sobre la del fonógrafo y restablecer el sincronismo perfecto.

CAPÍTULO III

MEDIDA DE LA ALTURA DE LOS SONIDOS INTERVALOS MUSICALES

406. **Medida de la altura de un sonido.** — 1º *Método gráfico.* — Puede emplearse el método gráfico para medir la altura de un sonido: basta inscribir, al lado del movimiento del cuerpo vibrante, el movimiento de un péndulo de segundos. Comparando las dos inscripciones (fig. 398), será fácil determinar el número de oscilaciones del cuerpo vibrante. Se cuenta el número de oscilaciones que corresponde a varios segundos y se divide el número hallado por el de segundos.

2º *Método acústico.* — *Sirena de Cagniard de Latour.* — El método acústico se aplica por medio de un pequeño instrumento, llamado *sirena* (fig. 399).

En la parte inferior del instrumento, que es todo de cobre, hay una caja cilíndrica, cubierta por un platillo fijo C. En este platillo descansa

una barra vertical A, a que se adapta un disco D, que puede girar libremente con el vástago; en el platillo C se practican agujeros circulares equidistantes, y en el disco D existe número igual de agujeros del mismo tamaño y a la misma distancia del centro que los del platillo. Estos agujeros no son perpendiculares a las superficies del platillo y del disco; pero mientras unos se inclinan todos un mismo ángulo en idéntico sentido, los otros se inclinan en sentido contrario, de manera que cuando los agujeros del disco y los del platillo están enfrente, son opuestos uno a otro. De esta disposición resulta que cuando llega procedente de los fuelles (fig. 401) a la caja cilíndrica y al agujero de C una corriente de aire rápida, hiere oblicuamente las paredes de los agujeros de D e imprime al disco D un movimiento de rotación.

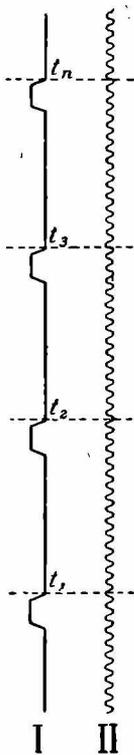


Fig. 398.

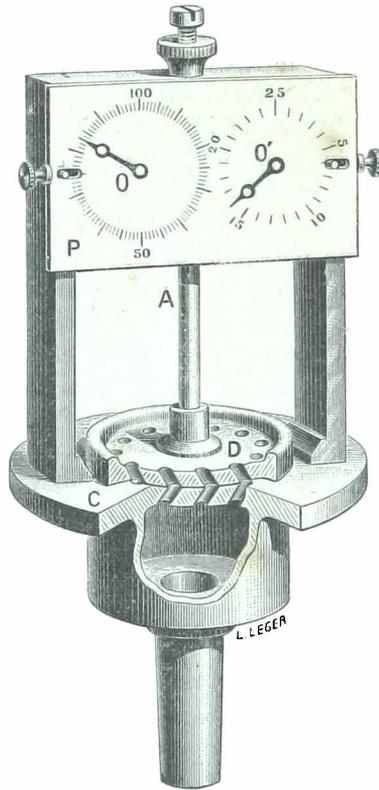


Fig. 399.

De esta disposición resulta que cuando llega procedente de los fuelles (fig. 401) a la caja cilíndrica y al agujero de C una corriente de aire rápida, hiere oblicuamente las

paredes de los agujeros de D e imprime al disco D un movimiento de rotación.

Supongamos que los discos tienen n agujeros. Durante una revolución del disco D, los agujeros se abren n veces y se cierran n veces. El aire que atraviesa los agujeros comunica impulsos al aire ambiente, que efectúa así n vibraciones dobles por vuelta. Así resultará un sonido tan luego como la velocidad sea bastante grande. La frecuencia N de este sonido se obtendrá evidentemente multiplicando el número n de agujeros por el número p de vueltas que dé el platillo en un segundo ($N = np$). Este último número se mide con un *contador de vueltas*.

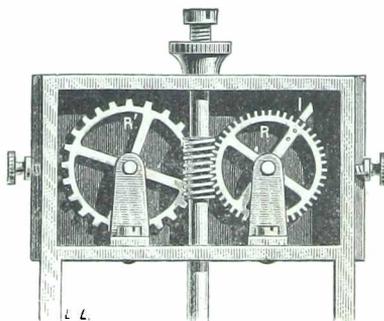


Fig. 400.

El vástago A sostiene un tornillo sin fin que transmite el movimiento a una rueda R provista de 100 dientes (fig. 400) y la hace adelantar un

diente para cada revolución del disco. Y como la rueda R tiene un tope I, éste hace andar a su vez a cada vuelta un diente de otra rueda dentada R'. Las dos ruedas llevan agujas que se mueven sobre dos cuadrantes e indican, una el número de vueltas del disco D y otra los centenares de vueltas. Dos botones permiten engranar o desengranar según convenga la pequeña rueda R con el tornillo sin fin.

Como el sonido va elevándose a medida que la velocidad del disco D

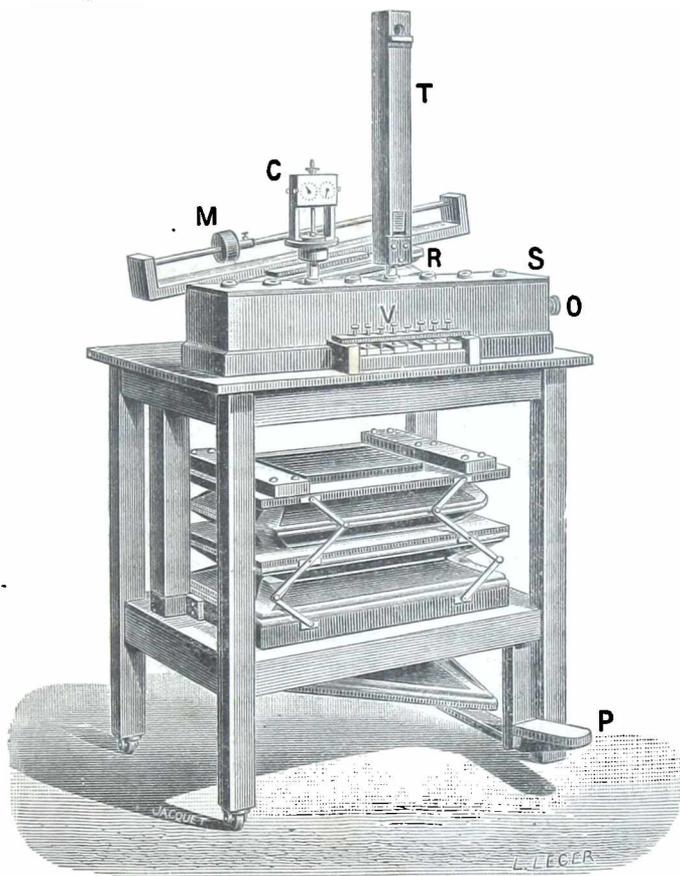


Fig. 401.

aumenta, basta con forzar el viento de los fuelles para que el aparato emita un sonido determinado. Para medir su altura, se mantiene la velocidad constante durante cierto tiempo, por ejemplo 20 segundos; después se leen las indicaciones de los dos cuadrantes y de ahí se deduce el número de vueltas que da el platillo en un segundo.

Para medir la altura del sonido de otro cuerpo sonoro que no sea la sirena, un tubo sonoro por ejemplo, se hace cantar la sirena al lado de dicho cuerpo *al unísono* (407). Entonces no hay más que medir la altura del sonido de la sirena.

OBSERVACIÓN. — Se ha observado que la sirena emite el mismo sonido

en el agua que en el aire, dada velocidad igual; lo mismo ocurre en los gases : esto prueba que la elevación de un sonido determinado no depende sino *del número* de las vibraciones, y no *de la naturaleza* del cuerpo sonoro.

Fuelles. — El aparato que sirve por lo común para *hacer hablar* la sirena y en general a toda especie de tubos sonoros, se llama *sistema de fuelles*. Cómponese de uno colocado entre las cuatro patas de una mesa y que funciona por medio de un pedal P (fig. 401). El aire impulsado se dirige á un depósito de cuero, muy flexible, que se hincha poco a poco. Comprimido el aire por dos placas de plomo que ejercen su peso sobre el depósito, pasa por un tubo a una caja S, colocada sobre la mesa y que sirve de peana. Esta caja sirve al mismo tiempo de sostén y de *distribuidor de aire* para los tubos. Los agujeros en que penetran las embocaduras de los tubos están cerrados con válvulas que se oponen al paso del fluido: pero delante de cada tubo hay una tecla V que abre la válvula y deja pasar el aire cuando se la aprieta. Cada válvula tiene un muelle que la levanta automáticamente desde que la tecla deja de apretarla.

Este sistema de fuelles tiene un regulador R, que sirve para arreglar la presión en la caja de aire S, moviendo la masa M.

407. **Clasificación de los sonidos.** — **Intervalos musicales.** — Se llama *intervalo* de dos sonidos la relación de sus números de vibraciones durante tiempos iguales, por ejemplo, durante un segundo.

Una melodía se caracteriza no por los números absolutos de vibraciones de sus sonidos sucesivos o *notas*, sino por sus intervalos. Siempre que se respeten estos intervalos, se puede, sin alterar un *aire*, cantar o ejecutar en notas altas o bajas.

Algunos intervalos tienen especial importancia, porque se emplean exclusivamente en música y se denominan *intervalos musicales*. Entre ellos, después del *unísono*, realizado por dos sonidos *de igual altura*, el más fácil de distinguir por el oído es la *octava*, realizada por dos sonidos de los cuales uno produce un número de vibraciones dos veces mayor que el otro, en tiempos iguales.

Los intervalos *principales* empleados en música son :

1° el <i>unísono</i>	=	$\frac{1}{1}$.		5° la <i>quinta</i>	=	$\frac{3}{2}$.
2° la <i>segunda</i>	=	$\frac{9}{8}$.		6° la <i>sexta</i>	=	$\frac{5}{3}$.
3° la <i>tercera</i>	=	$\frac{5}{4}$.		7° la <i>séptima</i>	=	$\frac{15}{8}$.
4° la <i>cuarta</i>	=	$\frac{4}{3}$.		8° la <i>octava</i>	=	$\frac{2}{1}$.

Estos son los *intervalos principales*; pero también se usan en música otros *complementarios*, que se derivan de los precedentes, a saber :

9° la <i>segunda menor</i>	=	$\frac{16}{15}$.		10° la <i>tercera menor</i>	=	$\frac{6}{5}$.
----------------------------	---	-------------------	--	-----------------------------	---	-----------------

408. **Acordes.** — Cuando se producen simultáneamente dos o más sonidos, separados por intervalos musicales, resulta un *acorde*.

La sensación que produce este fenómeno es ya más o menos agradable

al oído, ya más o menos desagradable. En el primer caso se dice que el acorde es *consonante* y que es *disonante* en el segundo.

Los acordes más consonantes son los de *octava*, de *tercera mayor* y de *quinta*. Los acordes disonantes son los de *cuarta*, de *sexta*, de *segunda* y de *séptima*.

En general un acorde es *tanto más consonante* cuanto *más pequeños* son los dos términos de la razón que lo define.

El más agradable de todos los acordes es uno más complejo, formado por la producción simultánea de tres sonidos, en los cuales los dos últimos están separados del primero (sonido fundamental) por los dos intervalos de *tercera mayor* y de *quinta*. Tomando al primero por unidad, los números de vibraciones sucesivos están representados por los números enteros 4, 5, 6. Esto es lo que se llama el *acorde perfecto mayor*, por oposición a otro análogo, el *acorde perfecto menor*, que se obtiene sustituyendo una tercera menor en vez de la tercera mayor del precedente. Este está representado por los números 10, 12, 15.

409. **Armónicos.** — Llámense *sonidos armónicos* o sencillamente *armónicos*, unos sonidos cuyos números de vibraciones son entre sí como la serie natural de los números enteros 1, 2, 3, 4, 5, 6...

La superposición de dos de estos sonidos produce un acorde tanto más consonante, cuanto más bajos en la serie se les tome. En efecto, el segundo armónico es la octava del primero; el tercero (que equivale a $\frac{3}{2} \times 2$) es su doble quinta; el cuarto (que puede escribirse 2×2) es su doble octava; el quinto (que equivale a $\frac{5}{4} \times 4$) es su cuádruple tercera.

Además, los dos primeros armónicos producen la octava; el segundo y tercero, la quinta; el tercero y el cuarto, la cuarta; el cuarto y el quinto, la tercera. De manera que los armónicos (por lo menos los primeros de la serie) no producen sino acordes consonantes: de esto les vine su nombre.

410. **Escala musical.** — **Gama.** — Llámase *escala musical* una serie de sonidos empleados en música y separados unos de otros por intervalos musicales.

Estos sonidos se reproducen periódicamente en el mismo orden, por series de siete: cada serie se llama una *gama*, y los siete sonidos o *notas* de cada gama han recibido los nombres de *do*, *re*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si**.

Representando por 1 el número de vibraciones del sonido más grave, el *do* fundamental, se encuentra:

[A]	}	Notas	<i>do</i>	<i>re</i>	<i>mi</i>	<i>fa</i>	<i>sol</i>	<i>la</i>	<i>si</i>
		Números relativos de vibraciones.	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$

En las gamas sucesivas que constituyen la escala musical, las notas son todas múltiplos, por las potencias crecientes de 2, de las notas del mismo nombre de la gama fundamental.

* En Inglaterra y Alemania representan las siete notas por las letras C, D, E, F, G, A, B.

Las fracciones del cuadro [A] representan igualmente los intervalos respectivos de las seis últimas notas con relación a la primera. Y si además se buscan los intervalos sucesivos entre ellas, se encuentra* :

[B]	Notas	<i>do</i>	<i>re</i>	<i>mi</i>	<i>fa</i>	<i>sol</i>	<i>la</i>	<i>si</i>	<i>do</i>
	Números relativos de vibraciones.	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
	Intervalos sucesivos	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$	

No hay pues sino *tres* intervalos sucesivos *distintos* entre las siete notas de la gama, a saber $\frac{9}{8}$, $\frac{10}{9}$ y $\frac{16}{15}$. El primero, que el más extenso, se ha llamado *tono mayor*; el segundo, *tono menor*, y el tercero, que es el más pequeño, *semitono mayor*. Puede decirse, en consecuencia, que los intervalos sucesivos de la gama comprenden *dos tonos, un semitono, tres tonos y un semitono*.

El tono mayor y el menor son poco diferentes. Si una nota da n vibraciones por segundo, la nota que tiene un tono más alto corresponde a $n \times \frac{9}{8} = n'$, y la que tiene un tono más bajo corresponde a $n \times \frac{10}{9} = n''$. El intervalo de n' a n'' es $\frac{n'}{n''} = \frac{9}{8} : \frac{10}{9} = \frac{81}{80}$, el cual se llama *coma*. En general, se da el nombre de *tono* a los dos intervalos $\frac{8}{9}$ y $\frac{10}{9}$ que sólo difieren en una *coma*.

411. **Gama natural.** — **Sostenidos y bemoles.** — Esta gama, que empieza por la nota *do* y que por esto se llama *gama de do*, es la *fundamental* en la escala de la música : también se la denomina *gama natural*, por la razón que ahora veremos.

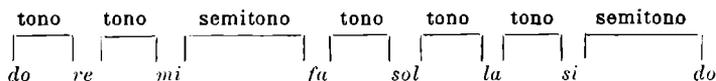
El *do* es la *nota fundamental*. También se la llama la *tónica*, porque da el *tono* a la gama; efectivamente, dícese de un trozo de música que está escrito con las notas de esta gama natural (o de sus octavas agudas o graves) cuando se halla *en el tono de do mayor***. La quinta nota, el *sol*, se llama la *dominante*, y la séptima, el *si*, es la *nota sensible*.

Como esta gama natural es insuficiente para las necesidades de la composición musical, se han creado otras mayores que tienen como tónicas las diferentes notas de la gama fundamental.

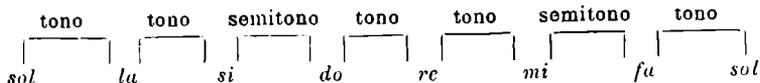
Sostenidos. — Tratemos, por ejemplo, de crear una nueva gama mayor, que tenga como tónica; la quinta de la gama fundamental, es decir, el *sol*. Las notas serán :

sol la si do re mi fa sol.

Esta serie de ocho notas no reproducirá *la melodía conocida por el nombre de gama* sino en tanto que los intervalos sucesivos de las ocho notas sean idénticos a los de la gama natural. Ahora bien, los de la gama natural son :



y los de la gama nueva



De manera que para reconstituir la melodía bastará con *transportar* este segundo semitono. Esto se obtiene *sosteniendo*, según la frase usual, la séptima nota, el *fa*. El método consiste en sustituir el *fa* primitivo, llamado *fa natural*, por una nueva nota el *fa sostenido* (que se escribe *fa #*), separada del *fa* natural por el intervalo $\frac{2}{2} \frac{4}{5}$. Así se establece, entre esta nueva nota y el *mi* precedente, el intervalo $\frac{2}{2} \frac{5}{4} + \frac{1}{16} = \frac{1}{9}$ es decir un *tono*. y entre el *sol* y esta nueva nota el intervalo $\frac{9}{8} : \frac{2}{2} \frac{5}{4}$ que no difiere de un *semitono* más que en una coma. Entonces la nueva serie

sol la si do re mi fa # sol,

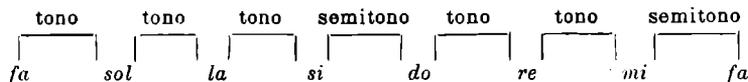
constituye un *gama mayor en tono de sol* (con un sostenido en la clave) idéntico a la *gama natural en tono de do*.

Análogamente se obtendrán seis otras gamas mayores, aplicando esta regla de *transposición* sucesivamente a todas las notas de la gama natural, do quinta en quinta. Se puede enunciarla de esta manera.

Para pasar de una gama mayor a otra mayor también, que tenga como tónica la dominante de la primera, basta tomar sucesivamente todas las notas de ésta, pero sosteniendo la sub-dominante.

Bemoles. — Hay otra manera de transportar. Tratemos de formar una nueva gama, tomando ahora como tónica la sub-dominante *fa* de la gama natural.

La serie de los intervalos será



Para volverlo a su posición normal, es decir entre la tercera y la cuarta nota, se *bemoliza* el *si* : método que consiste en sustituir el *si* primitivo, llamado *si natural*, por una nueva nota, que se denomina *si bemol* (se se escribe *b*), que está separada del *si* natural por el intervalo, $\frac{2}{2} \frac{4}{5}$, del *la* precedente por un *semitono*, y del *do* siguiente por un *tono*. Entonces se tiene la nueva serie

fa sol la si b do re mi fa,

que constituye una nueva gama mayor (llamada en *fa mayor*, con un bemol en la clave), idéntica a la *gama natural en do mayor*.

Así se formarán análogamente otras seis gamas mayores aplicando sucesivamente, de cuarta en cuarta, a todas las notas de la gama natural, esta segunda regla de transposición. Se puede formularla de la manera siguiente :

Para pasar de una gama mayor cualquiera a otra mayor, que tiene como tónica la sub-dominante de la primera, basta tomar todas las notas de ésta, pero bemolizando la nota sensible.

OBSERVACIÓN. — Cuando se quiere volver a sus valores naturales a las notas sostenidas o bemolizadas, se les pone un signo particular ♮ llamado *becuadro*.

412. *Gamas menores.* — *Tonos relativos.* — Cada una de las gamas precedentes está caracterizada por un *acorde perfecto mayor*, formado por la superposición de la tónica, de la tercera y de la quinta de la gama.

A cada gama mayor corresponde otra menor caracterizada por el *acorde perfecto menor*. La gama menor correspondiente a la gama de *do mayor* tiene como tónica el *la* de ésta. Hállase caracterizada por el lugar del primer semitono que está entre la séptima y la octava nota de la precedente gama de *do mayor*, y del segundo semitono, que está entre la séptima y la octava nota de la nueva gama, lo que exige que la sexta y la séptima sean *sostenidas*. Tiénese pues la gama siguiente,

*la si do, re, mi, fa, # sol, # la,**

* Marcamos las 6 últimas notas por un índice (,) a fin de indicar que ya no pertenecen a la gama fundamental, sino a la siguiente.

que está caracterizada por el acorde perfecto *la-do-mi*, que es menor, y se dice que este tono de *la menor* es relativo del tono de *do mayor*.

El tono menor *relativo de cada una de las gamas mayores*, precedentes se determinará aplicándoles sucesivamente la misma regla.

413. *Gama temperada. — Temperamento. —* Entre una nota cualquiera *sostenida* y la siguiente *bemolizada*, el intervalo es sumamente pequeño; pero no nulo. Es posible vencerse de ello calculando, por ejemplo, el intervalo de un *re* # y de un *mi* b. Tiénese.

$$re \# = \frac{9}{8} \times \frac{25}{24} \quad \text{y} \quad mi \ b = \frac{5}{4} \times \frac{24}{25},$$

de donde

$$\frac{mi \ b}{re \ \#} = \frac{128}{125}.$$

Es fácil probar que este intervalo *es mayor* que la coma; luego no se le puede despreciar. Una octava completa se compone, pues, en realidad, de las siete notas naturales, *más siete sostenidos, más siete bemoles*: en total *veintiuna* notas.

Puédese, al menos teóricamente, ejecutar todos estos grados sucesivos con la vez humana y con instrumentos de sonido variable, tales como el violín o el contrabajo; pero tratándose de instrumentos de sonidos fijos, como el piano o el arpa, la realización de una octava completa no sería práctica por causa del excesivo número de *teclas y cuerdas* que habría que poner al instrumento. En consecuencia, se ha resuelto remplazar la nota sostenida y la bemolizada siguiente por una nota intermedia entre las dos, de modo que se constituya una gama completa mixta, con doce grados o intervalos sucesivos, igualmente distantes.

La gama así obtenida se llama *gama temperada*. El intervalo constitutivo de esta gama es el *temperamento o semitono medio*. Como hay doce entre el *do* fundamental y el *do* siguiente, este temperamento resulta igual a $\sqrt[12]{2}$ (= 1,059). Se diferencia ligeramente del semitono mayor (1,066).

414. *Diapasón. —* El *diapasón* es un pequeño instrumento por medio del cual se produce a voluntad una nota invariable: úsasele para afinar los instrumentos de música. Como ya le hemos descrito anteriormente (389), sólo añadiremos que el sonido se refuerza por *resonancia* (449) fijando el instrumento en una caja de madera blanca, abierta en un extremo (fig. 374).

El número de vibraciones del diapasón varía con la longitud y grueso de sus dos ramas. Por consiguiente se pueden construir instrumentos que den una nota cualquiera de la gama, arreglándolos para este fin. Llámase *diapasón normal* el que da una nota fijada arbitrariamente: el *la*₃. En 1859 se hizo obligatorio el uso de un *diapasón normal* para todos los establecimientos musicales de Francia.

Este diapasón ejecuta 435 vibraciones simples por segundo. El *la*₃ fué definido al mismo tiempo, recibiendo el nombre de *la normal**.

415. *Notación de las diversas gamas naturales. — Números absolutos de vibraciones. —* Siendo completamente arbitrario el número absoluto de vibraciones que corresponde al *do* fundamental, puede admitirse una serie indeterminada de gamas. Como punto de partida de la escala musical se ha designado el sonido más grave del *bajo* convirtiéndolo en el *do* de la primera gama, cuyas notas se caracterizan con el índice 1 según consentimiento general**: entonces se designan las notas de las gamas más agudas por los índices 2, 3, ..., y las de las gamas más graves por los índices - 1, - 2, ... Así *fa*₂ es la octava aguda de *fa*₁ y *fa*₋₁ es su octava grave.

Fácil es deducir del *la*₃ normal todos los números absolutos. Por ejemplo, el *do*₃ dará la ecuación

$$\frac{la_3}{do_3} = \frac{3}{2}, \quad \text{de donde} \quad do_3 = \frac{3}{2} \times 435 = 261 \text{ vib. completas.}$$

* El diapasón normal está depositado en el Conservatorio de música de París.

** Este convenio fué propuesto por el físico Sauveur.

Limites de la escala musical. — En música se usan notas todavía más graves en dos octavas que el do_1 de Sauveur. Márcase la primera octava inferior do_{-1} ... y la octava que está por debajo do_{-2} ... Sus números de vibraciones se deducen fácilmente de los anteriores. Tíense $do_{-1} = 32,62$ y $do_{-2} = 16,31$. Este límite de los sonidos graves está dado por el caño mayor de los grandes órganos.

Los pianos modernos van desde el la_{-2} al la_6 : de manera que su registro comprende siete octavas. El límite de los sonidos agudos que marca el flautín moderno es la_6 .

La chirimía sistema Bøhm sube hasta el si_6 ; mientras que el clarinete pedal baja hasta el la_{-2} : por consiguiente la extensión instrumental comprende más de siete octavas.

La escala de las voces humanas es más limitada todavía. Abarca unas tres octavas más una quinta a partir de fa_1 , que es el sonido más grave del bajo.

CAPÍTULO IV

PROPAGACIÓN DE LAS VIBRACIONES

416. Propagación del sonido. — Las vibraciones de los cuerpos elásticos no pueden producir en nosotros la sensación del sonido más que por la intervención de un medio ponderable, situado entre el oído y el cuerpo sonoro.

Supongamos, en efecto, que se coloque debajo de la campana de una máquina neumática un timbre o campanilla metálica que toque de manera automática, movida por un aparato de relojería (fig. 402). Mientras la campana esté llena de aire a la presión ordinaria, se oirá el llamar del timbre; pero a medida que el fluido va enrareciéndose, la intensidad del sonido disminuye, dejando al fin de ser perceptible, aunque el timbre no haya dejado de funcionar, cuando ha llegado el vacío a un grado suficiente*.

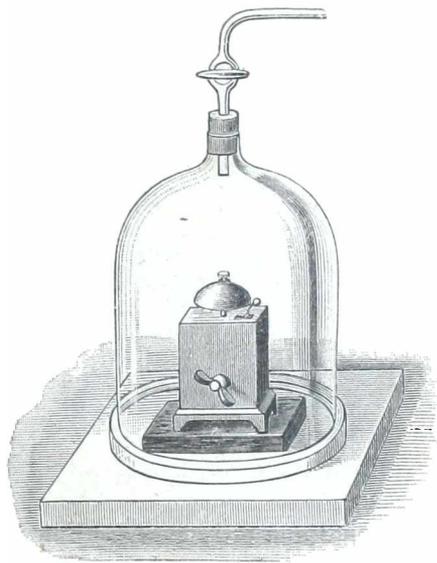


Fig. 402.

Si en los experimentos anteriores se empieza por hacer el vacío y después se introduce en el recipiente un gas o un vapor, oyesse de nuevo el timbre o la campanilla: esto demuestra que el sonido se propaga en los gases y en los vapores como en el aire.

Aun lo hace mejor en los líquidos. Cuando se hacen chocar dos piedras dentro del agua, en un río, se oye distintamente desde la orilla

* Para que el experimento salga bien, hay que poner la campanilla sobre algodón en rama; de otro modo las partes metálicas del instrumento transmitirían sus vibraciones a la platina de la máquina neumática, y ésta al aire exterior.

el ruido que producen. Al contrario, un buzo oye en el fondo del líquido lo que se dice fuera.

Cuanto a los sólidos, su conductibilidad es tan grande, que un ruido sumamente ligero, como el de una barba de pluma que se frota contra la extremidad de una viga de madera, se distingue desde la otra punta. El suelo conduce el sonido tan bien que, aplicando el oído al suelo durante la noche, se pueden percibir a grandes distancias pisadas de caballos o cualquier otro ruido.

Velocidad del sonido. — La propagación del sonido en los gases, los líquidos o los sólidos no es instantánea: el sonido no puede transmitirse de un punto a otro sino en un intervalo más o menos largo. Así lo demuestra gran número de fenómenos, entre otros el trueno: al cabo de algún tiempo de ver el relámpago se oye el ruido, por más que su producción ha sido simultánea en la nube. La luz se propaga con velocidad extrema (300 000 kilómetros por segundo); por lo tanto, el intervalo de tiempo observado es sensiblemente igual al tiempo que el sonido emplea en llegar a nuestro oído.

Llámase *velocidad del sonido*, en un medio que lo transmite, *el espacio que en él recorre durante un segundo* (435).

417. Propagación de las vibraciones. — Vibraciones transversales.

— Imaginemos una larga cuerda A, fija en X (fig. 403); si, con la mano, producimos una sacudida cualquiera en el extremo A, levantando, por ejemplo, la cuerda, bruscamente, y volviéndola a su posición primitiva, veremos que dicha sacudida se propaga sucesivamente a todo lo largo de la cuerda (fig. 403).

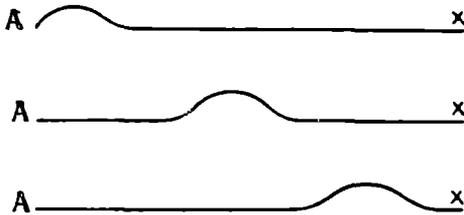


Fig. 403.

Además, al llegar a un punto X, refléjase el movimiento, como

veremos luego (426), dejando, por ahora, este fenómeno. Es fácil observar que la propagación de la sacudida se verifica con movimiento uniforme. Designaremos por V su velocidad.

Al paso de la sacudida, cada punto de la cuerda efectúa un movimiento de subida y descenso. Como este movimiento se produce perpendicularmente a la dirección de la propagación, se dice que la sacudida es *transversal*.

Si comunicamos, ahora, una serie de vibraciones transversales al extremo A de la cuerda, un punto M cualquiera (fig. 404) efectuará los mismos movimientos; pero con cierto retraso que es igual al tiempo que el movimiento vibratorio emplea en propagarse de A a M. Por lo tanto, entre el movimiento de M y el de A, hay *diferencia de fase*.

Si el punto A no efectuara más que una vibración AA'AA''A (fig. 404), al volver a A, la forma de la cuerda sería evidentemente la representada en la figura (I). Y, después, el movimiento se propagaría por espacios muy pequeños; de tal modo, que un momento después, la cuerda adop-

taria la forma (II). El conjunto de las dos partes en movimiento, elevada la una y baja la otra, constituye una *onda* de vibración.

Su longitud, denominada *longitud de onda*, es la distancia recorrida por la vibración durante un periodo de movimiento.

Si llamamos V a la velocidad de propagación, T al periodo y N a la frecuencia, la longitud de onda, que se designa por λ , se expresa por la fórmula :

$$\lambda = VT, \quad \text{o} \quad \lambda = \frac{V}{N}.$$

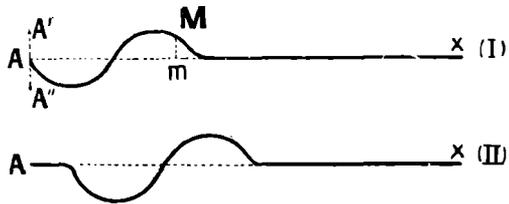


Fig. 404.

Si, ahora, A se halla animado por un movimiento vibratorio continuo, una onda sucede inmediatamente a otra y así sucesivamente, de manera que si, en un momento dado, tiene la cuerda la forma que representa la senoide figurada con trazo lleno (fig. 405)



Fig. 405.

tendrá, un momento después, la forma representada por el trazado de puntos, y así sucesivamente. Al paso de las ondas, cada punto de la cuerda efectúa vibraciones transversales.

La figura 406 representa, además, las posiciones de la cuerda en un momento dado; luego, sucesivamente, después de un cuarto de periodo, un semiperíodo y tres cuartos de periodo. Las flechas indican el sentido del movimiento de cada punto.

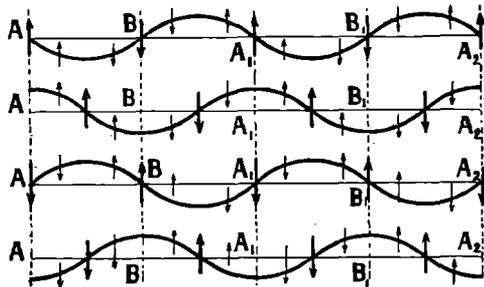


Fig. 406.

Se ve que los puntos A_1, A_2 , que distan de A una, dos longitudes de onda, o, en general, un número entero de longitudes de onda, efectúan movimientos que no tienen ninguna diferencia de fase con los movimientos de A .

Se ve también que los puntos B, B_1 , que se hallan situados a distancias sucesivas de A iguales a $\frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}$, y, en general, a un número impar de semilongitudes de onda, realizan movimientos que están siempre en oposición de fase con el movimiento de A .

Ecuación del movimiento de un punto cualquiera de la cuerda. — Sea M un punto de la cuerda (fig. 404) que, en su posición de equilibrio, se halla a una distancia d del punto A . Sean, además, $s = a \text{ seno } 2\pi \frac{t}{T}$, la ecuación del movimiento de A y V la velocidad de propagación del movimiento vibratorio a lo largo de la cuerda. Todo movimiento que efectúa A se reproduce en M al cabo de un tiempo igual a $\frac{d}{V}$. Su ecuación es, pues :

$$s' = a \text{ sen. } 2\pi \frac{t - \frac{d}{V}}{T} = a \text{ sen. } 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{VT} \right) = a \text{ sen. } 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{\lambda} \right).$$

Se ve que si $d = \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots, K\lambda$ (siendo K un número entero), $s' = s$; mientras que si $d = \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \dots, (2p + 1)\frac{\lambda}{2}$ (siendo p un número entero), se tendrá $s' = -s$.

Propagación de las ondas en un líquido. — Análogos fenómenos se observan cuando se produce una sacudida o una serie de sacudidas en la superficie de un líquido. Estas se propagan por cavidades circulares a partir del *centro de sacudida*. A su paso, cada punto del agua se eleva o desciende simplemente, lo cual se comprueba con observar el movimiento de un cuerpo ligero en la superficie de un líquido.

Propagación de las vibraciones sonoras transversales. — En gran número de casos, el sonido se propaga en un sólido, por vibraciones transversales; como sucede notablemente en las cuerdas sonoras (440). Todo cuanto precede, puede, pues, aplicarse a estas vibraciones sonoras.

418. **Propagación de las vibraciones longitudinales.** — Las vibraciones transmitidas en el seno de una masa fluida, líquida o gaseosa, no pueden ser nunca perpendiculares a la dirección de propagación; son *longitudinales*, es decir, que se verifican en la misma dirección de la propagación. Además, los sólidos pueden propagar las vibraciones longitudinales tan bien como las vibraciones transversales.

He aquí un ejemplo de propagación de vibraciones longitudinales :

Consideremos un tubo indefinido lleno de aire. Supongamos que en su orificio se halle un émbolo que se introduce bruscamente. Las capas de aire próximas al émbolo se comprimen; pero, un momento después, vuelven a la presión primitiva rechazando las capas siguientes que se comprimen a su vez, y así sucesivamente. Por consiguiente en el tubo se propaga una *compresión*.

Si, al contrario, se retira bruscamente el émbolo, se produce contra él una disminución de presión, o *dilatación*; las capas de aire contiguas son rechazadas atrás para llenar ese vacío y dilátanse a su vez, de modo que la dilatación se propaga por el tubo. Además, al paso de la compresión y la dilatación, las moléculas de aire efectúan evidentemente movimientos longitudinales.

Supongamos, ahora, que el émbolo (que puede sustituirse por una placa vibrante o por un diapasón) efectúa una serie de vibraciones, en el origen A (fig. 407).

Como en el caso de las vibraciones transversales, cierto tiempo después, toda elongación de A se hallará en una sección determinada del tubo.

Por consiguiente, se puede representar la propagación de una serie de vibraciones en un tubo, como se ha hecho con las vibraciones transversales de una cuerda, con tal que se tenga presente que los movimientos ocurren paralelamente a la dirección del tubo.

Supongamos que la sección origen A, que puede oscilar entre A' y A'', pase, en un momento dado, por su posición de equilibrio A, caminando en el sentido A''A'; las elongaciones de los diversos puntos del tubo pueden ser representadas por las ordenadas de una senoide, figurada encima del tubo.

Por ejemplo, la sección C posee, en el momento considerado, una

elongación negativa igual a cc'' , es decir, que, en vez de estar en su posición de equilibrio C, esta sección se halla, en realidad, en C'' , a una distancia $CC'' = cc''$. Asimismo, la sección D tiene una elongación positiva dd' , es decir, que es en D' , tal que $DD' = dd'$.

Por otra parte, el estado de las diversas secciones del tubo se modifica un momento después. Fácilmente se hallarán, en cada momento, las elongaciones de las secciones sucesivas, imaginando que la curva senoide que representa estas elongaciones cambia de lugar, como se ha indicado en las figuras 405 y 406.

OBSERVACIONES. — 1ª. En la figura 407, se ve que la masa de aire que estaba en equilibrio entre C y D ha aumentado de volumen; puesto

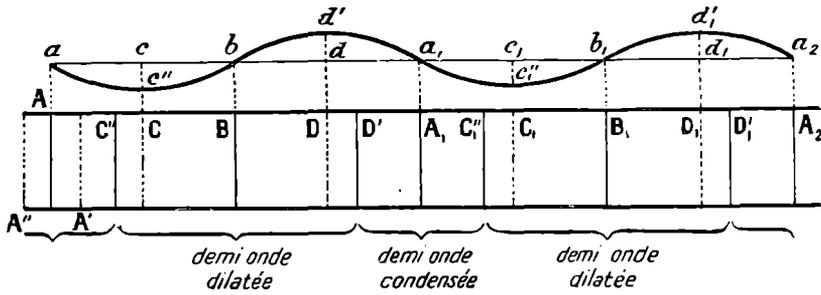


Fig. 407.

que ahora se halla entre C'' y D' . Por consiguiente, la presión ha disminuido en toda esta región del tubo, en donde reina una dilatación. Lo mismo ocurre entre C''_1 y D'_1 . Por el contrario, el volumen comprendido entre C_1 y D ha disminuido; toda vez que, ahora, se encuentra entre D' y C''_1 . En esta región domina una compresión.

Las dilataciones máximas están en B, B_1 , etc. Las contracciones máximas, en A, A_1 , A_2 . En cambio, en la regiones próximas a las secciones C'' , D' , C''_1 , D'_1 que, en el momento considerado, tienen sus elongaciones máximas, no hay compresión ni dilatación.

Toda onda se compone, pues, de una mitad *condensada* y otra mitad *dilatada*, que se propagan simultáneamente por el tubo.

2ª. Las secciones A, A_1 , A_2 ..., que están separadas por un número entero de longitudes de ondas, tienen, durante la propagación, en todo momento, la misma elongación y en ellas existe la misma presión.

3ª Ecuación del movimiento de una sección cualquiera. — Si la ecuación del movimiento de A es $s = a \text{ sen. } 2\pi \frac{t}{T}$, la ecuación del movimiento de un punto cualquiera del tubo separado de A por una distancia d , en su posición de equilibrio, es

$$s' = a \text{ sen. } 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{\lambda} \right),$$

llamando λ a la longitud del movimiento que se propaga en el tubo.

4ª Orden de magnitud de las longitudes de onda de los sonidos. — En el aire la velocidad del sonido es de unos 340 metros por segundo; para el *la* ($T = \frac{1}{435}$) la longitud de onda es pues $\lambda = 340 \times \frac{1}{435} = 0^m,80$ poco más o menos. Para el sonido más grave ($T = \frac{1}{16}$) se tiene $\lambda = 21$ metros poco más o menos. y para el sonido más alto empleado en música ($T = \frac{1}{4000}$), $\lambda = 0^m,085$ próximamente.

419. **Propagación de las vibraciones en una atmósfera ilimitada.** — Supongamos, en un punto de la atmósfera, una esfera cuyo radio aumente y disminuya alternativamente. Esta esfera transmite al aire ambiente contracciones y dilataciones sucesivas en todos sentidos. Al mismo tiempo, a partir de la esfera, propáganse elongaciones longitudinales, alternativamente en un sentido y en el opuesto.

Este caso se realiza poco más o menos por cualquier cuerpo vibratorio colocado en el aire.

Superficies de ondas. — Cuando se propaga en un medio un movimiento vibratorio, llámase *superficies de ondas* a los lugares que, en un momento dado, tienen movimientos vibratorios de igual fase. En el caso de un cuerpo vibrante colocado en una atmósfera indefinida, las superficies de onda son, evidentemente, superficies esféricas. En el caso de la propagación en un tubo, dichas superficies de onda son planos.

Rayos. — Por analogía con los fenómenos luminosos (457), las direcciones de propagación de las ondas se denominan *rayos*. Los rayos son las perpendiculares a las superficies de onda.

Cuando un sonido, emitido por un cuerpo vibrante de pequeñas dimensiones, se propaga por un medio indefinido, todas las direcciones que parten del cuerpo vibrante se llaman *rayos sonoros*; son los radios *geométricos* de las superficies esféricas que constituyen las superficies de ondas.

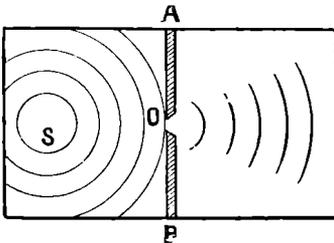


Fig. 408.

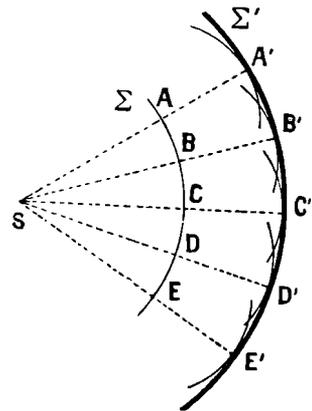


Fig. 409.

En la propagación de un sonido por el interior de un tubo, toda paralela al eje del tubo es un rayo sonoro.

420. **Mecanismo de la propagación de las ondas en un medio indefinido.** — En un punto S (fig. 408) de la superficie del agua contenida en un vaso, prodúcese una serie de sacudidas. El vaso queda dividido en dos partes, por un tabique AB que tiene una abertura O. En el compartimiento de la izquierda se ve propagarse líneas circulares cuyo centro es S, y en el de la derecha, líneas circulares de *centro* O. Luego el punto O se ha convertido también en centro de sacudida.

Supongamos un medio indefinido, el aire, por ejemplo, en el que se propague un movimiento vibratorio, que parte de S (fig. 409), y llamemos Σ a una superficie de onda, en un instante que tomaremos como origen del tiempo. Los diversos puntos A B C D E de esta superficie pueden considerarse como centros de sacudida.

Según esto, en un tiempo t después del momento considerado, la fase del movimiento vibratorio del punto A debería encontrarse en la superficie de una esfera de centro A y

de radio Vt . Lo mismo sucede con los puntos B, C, D... Y, sin embargo, el estado vibratorio que se hallaba en Σ en el tiempo cero, es el único que en el tiempo t , se halla en la superficie esférica Σ' que dista de Σ , una longitud Vt . Esta superficie Σ' es la envolvente de las superficies esféricas descritas de los diversos puntos A, B, C, D de Σ con el radio Vt .

De donde se deduce que los movimientos que parten de los puntos A, B, C, D... se superponen en los diversos puntos del espacio, o, como generalmente se dice, se *interfieren* (431), de tal manera que sólo los puntos de Σ' poseen en el tiempo t , la fase del movimiento vibratorio que tenía Σ en el tiempo cero.

421. Intensidad de un sonido que se propaga en el aire. — Límite de intensidad de los sonidos perceptibles. — Cuando un cuerpo resueva en el aire, comunica al aire que le rodea, una porción de su energía vibratoria, en un tiempo dado. Si se coloca un observador próximo al foco, recibe, en el oído, parte de la energía vibratoria del aire. La intensidad del sonido percibido es evidentemente proporcional a la cantidad de energía recibida en un tiempo dado y se toma como medida de la intensidad del sonido en un punto del aire, *la energía vibratoria que cae, en un segundo, sobre una superficie de 1 centímetro cuadrado colocado en este punto, normalmente a la dirección de propagación de las ondas.*

Cuando se propaga libremente un sonido en el aire, la energía que el foco cede al aire se transmite de molécula en molécula y atraviesa sucesivamente esferas cada vez más grandes. Un observador que se aproxime recibe, pues, en un tiempo dado, mayor cantidad de energía que un observador que se halle lejos. Por esta razón, disminuye la intensidad del sonido percibido al alejarse del foco sonoro.

Supongamos un foco sonoro colocado en S (fig. 410), en el seno de la atmósfera. Consideremos la energía E que aquél comunica al aire durante un segundo. Durante la propagación de las vibraciones, esta energía se hallará comprendida siempre entre dos superficies esféricas, cuyos radios difieren de V (V es la velocidad de propagación del sonido en el aire). Consideremos un elemento de superficie de 1 centímetro cuadrado, colocado normalmente a la dirección de propagación de las ondas y a la distancia R de S. Durante un segundo, la superficie S de la esfera de radio R es atravesada por la energía vibratoria E.

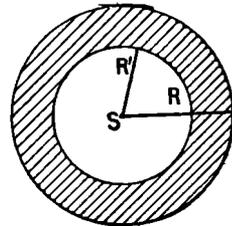


Fig. 410.

La superficie 1 cm^2 no recibe más que $\frac{E}{S}$ o $\frac{E}{4\pi R^2}$ de energía. Tal es la expresión de la intensidad del sonido percibido. Se ve, pues, que *la intensidad del sonido percibido varía en razón inversa del cuadrado de la distancia del observador al foco sonoro.*

Los sonidos más débiles que podamos percibir corresponden a una energía vibratoria sumamente pequeña. Lord Rayleigh dedujo de sus experimentos sobre esta energía, que se pueden percibir oscilaciones de aire que pertenecen al orden de magnitud de millonésima de milímetro. Además, de los experimentos de Pellat, resulta que una cantidad de energía de 0,426 kilográmetros (equivalente a una pequeña caloría) es

capaz de mantener un sonido perceptible durante 10 000 años. Y M. Abraham ha demostrado, recientemente, que la energía necesaria para mantener perceptible un sonido es aún menor. Según él, el oído percibe variaciones de presión del orden de $0,0004 \mu$ de mercurio.

Energía necesaria para la fonación. — Experimentos del Dr Marage. — Marage estudió la energía que debe consumir un orador para dejarse oír en diversas salas de París. Fácil es demostrar que dicha energía es el producto del volumen de aire que se escapa de los pulmones por la presión de este aire antes de salir de la laringe.

He aquí las conclusiones de estos experimentos: En la conversación ordinaria, se desarrolla, durante una hora, un esfuerzo de 48 kilográmetros próximamente, es decir, que en una conversación no se emplea potencia superior a la necesaria para levantar, en cada segundo, un peso de 130 gramos a 10 centímetros de altura. Para pronunciar un discurso en una sala grande, el trabajo es mayor; poco más o menos es de 200 kilográmetros por hora.

La energía necesaria depende del registro de la voz. En las voces de bajo es mayor que en todas las demás, porque aquellas exigen volumen de aire más grande. Una mujer emplea, término medio, una energía cuatro veces más pequeña que un hombre. La consecuencia práctica de estos experimentos es que el esfuerzo desarrollado depende especialmente del volumen de aire espirado; por lo tanto, un orador debe aprender a almacenar aire en sus pulmones y a no dejarlo escapar inútilmente.

422. Conservación de la intensidad del sonido durante la propagación

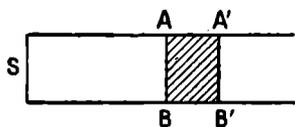


Fig. 411.

en un tubo. — Si el foco S está constituido por una placa vibrante en el orificio de un tubo cilíndrico (fig. 411), las superficies de onda son planos paralelos. La energía E, comunicada al aire durante la unidad de tiempo está, en cada momento de su propagación, contenida en el mismo volumen ABA'B'; por

consiguiente, la intensidad debe ser la misma a cualquier distancia del foco. De este modo, constató Biot que, en una cañería de agua de París, de 951 metros, la voz perdía tan poco de su intensidad que, de un extremo a otro de dicha cañería, se podía sostener conversación en voz baja.

De todas maneras, la debilitación del sonido puede hacerse sensible, a causa de la pérdida de energía vibratoria, en los tubos de gran diámetro, o en aquellos cuyas paredes presenten deformidades, como se observa en los subterráneos y galerías.

Aplicaciones. — 1º *Speaking tubes.* — Una de las más comunes consiste en los tubos acústicos o de conversación para hablarse a distancia. Vienen a ser verdaderos teléfonos acústicos, pero de escaso alcance.

Consisten ordinariamente en conductos cilíndricos, flexibles, de caucho, que terminan en dos embocaduras de hueso o ebonita; en cada una de ellas se encaja un silbato (fig. 412). Primero se sopla en el tubo para que un silbido avise a la persona con quien se desea hablar. Ésta hace lo mismo, para indicar que está en su puesto, y después se pone la embocadura en el oído, mientras que el interlocutor habla en voz baja por la otra embocadura.

2º *Bocina*. — Este instrumento se funda al mismo tiempo en el refuerzo y en la facilidad de transmisión del sonido por los tubos.

Destínasele a transmitir la voz a distancia. Consiste en un tubo de latón u hojalata (fig. 413), ligeramente cónico y algo ensenchado en una de sus aberturas, que se llama *pabellón*. Háblase por el otro extremo, y la vez llega tanto más lejos cuanto mayores son las dimensiones de la bocina.

Una buena bocina puede hacer distinguir sonidos hasta 5^o o 6 kilómetros de distancia, sobre todo si no son articulados.

3º *Trompeta acústica*. — La trompeta acústica presta grandes servicios a las personas que tienen el *oído duro*. Consiste en un tubo cónico de metal que termina por uno de sus extremos en un *pabellón* destinado a la recepción de los sonidos, mientras que el otro se introduce en el oído. Aquí el *pabellón* sirve de embocadura, es decir que recibe los sonidos de la persona que habla. Estos sonidos se transmiten por una serie de reflexiones



Fig. 412.



Fig. 413.

a la parte interior de la trompeta, de modo que las ondas, en vez de adquirir mucho desarrollo, se encuentran concentradas en el aparato auditivo, produciendo en éste efecto mucho más sensible del que hubieran tenido las ondas divergentes.

4º *Estetoscopio*. — Llámase así a un pequeño amplificador empleado en medicina para auscultar a los enfermos. De los varios que se han inventado vamos a describir el construido por Koenig.

Consiste en una cápsula de cobre cerrada por una membrana de caucho *c*, y está dividida por dentro en dos compartimientos por otra membrana *a*, de modo que al introducir aire entre las dos membranas mediante una llave lateral, aquéllas toman la forma de una lente biconvexa (fig. 414). Del centro de la cápsula de cobre sale un tubo de caucho ter-

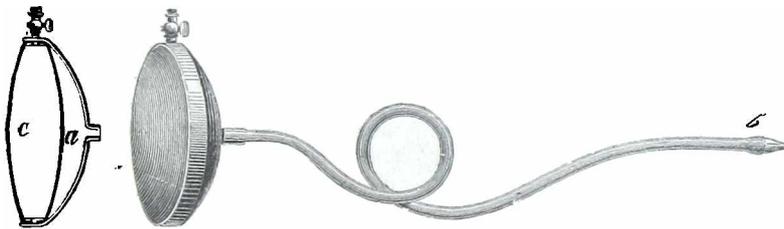


Fig. 414.

minado en un pedazo de cuerno o de marfil *b*. El médico introduce la punta del conducto en su oído a la vez que aplica la membrana *c*, por ejemplo sobre el pecho del enfermo.

Los latidos del corazón y los ruidos de la respiración se transmiten fielmente al aire contenido en la cámara *ac* y de aquí al oído por el tubo de caucho. Una persona puede auscultarse a sí misma, y si el aparato tuviera varios tubos, otras tantas personas podrían auscultar simultáneamente al mismo sujeto.

423. *Influencia de los movimientos de una fuente sonora y del observador sobre la altura del sonido percibido*. — 1º Supongamos que una fuente sonora que produzca un sonido de altura constante, cuya frecuencia es *N*, se acerque a un observador.

Sean S su posición al principio de un segundo y S' su posición al fin del mismo segundo (fig. 415) : la distancia SS' es igual a la velocidad de la fuente sonora que designaremos por v y que supondremos pequeña con relación a la velocidad V de propagación de las ondas. Durante su trayecto de S a S', la fuente ha emitido N ondas; cuando se encuentra en S' el frente de la primera de estas ondas está en A, a una distancia SA = V , mientras que la última onda parte de S' en ese momento. Las N ondas emitidas están, pues, comprendidas en el espacio S'A = $V - v$; luego la longitud de onda viene a ser

$$\lambda' = \frac{V - v}{N}. \tag{1}$$

El espacio, delante de S, está cubierto de ondas de longitud λ' . Si hay en O un observador inmóvil recibe evidentemente, en un segundo, todas las ondas comprendidas en un espacio BO = V ; el número de estas ondas es, pues,

$$N_1 = \frac{V}{\lambda'}, \quad \text{o} \quad N_1 = N \frac{V}{V - v}. \tag{2}$$

Se ve que $N_1 > N$. Luego : cuando la fuente se acerca al observador inmóvil, éste percibe un sonido de frecuencia mayor que la frecuencia del movimiento vibratorio de la fuente.

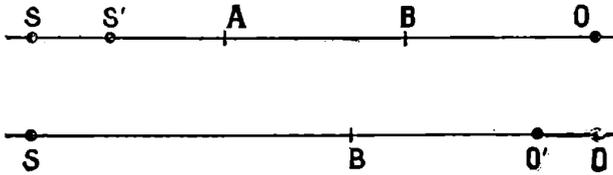


Fig. 415 y 416.

Si, por lo contrario, la fuente se aleja con una velocidad igual a (v) en valor absoluto, se ve en seguida que la longitud de onda viene a ser $\frac{V + (v)}{V}$, y la frecuencia percibida $N \frac{V}{V + (v)}$. Pueden emplearse aún las formulas (1) y (2), con tal que se considere como positiva la velocidad de la fuente, si esta se acerca al observador, y como negativa en el caso contrario. Por consiguiente : cuando la fuente se aleja del observador inmóvil, éste percibe un sonido de frecuencia más pequeña que la frecuencia del movimiento vibratorio de la fuente.

Consecuencia. — Cuando una locomotora pasa silbando delante de un observador inmóvil, en el mismo momento en que le pasa, el observador percibe un brusco descenso de la altura del sonido. Es que, en efecto, mientras que la locomotora se acercaba al observador, éste percibía un sonido más alto que el que realmente emitía el silbato; cuando la locomotora ha pasado al observador, se aleja de él y percibe un sonido más bajo,

Si N es la frecuencia real del sonido emitido por el silbato, N_1 la frecuencia del sonido percibido antes del momento en que la locomotora pasa delante del observador, N_1' la frecuencia del sonido percibido después de ese momento, y (v) el valor absoluto de la velocidad de la locomotora, se tiene :

$$N_1 = N \frac{V}{V - (v)}, \quad N = N_1' \frac{V}{V + (v)}$$

Luego el *intervalo* entre los dos sonidos N_1 y N_1' es

$$\frac{N_1}{N_1'} = \frac{V + (v)}{V - (v)}$$

2º Supongamos ahora que la fuente sonora está fija, en S (fig. 416) y que el observador se acerca a ella con la velocidad v' . Sean O la posición del observador en un momento dado y O' su posición un segundo después; se tiene OO' = v' . Tomemos, a partir de O' y hacia la fuente S, una longitud O'B = V . Si el observador hubiese estado inmóvil, en O', hubiera recibido, en un segundo, las ondas comprendidas entre B y O'; pero, como él ha recorrido además la longitud OO' ha recibido todas las ondas, que, en el momento de pasar por O, estaban contenidas en el espacio OB = $V + v'$.

Por lo, como la fuente está fija, la longitud de onda es $\lambda = \frac{V}{N}$ (417). La frecuencia N , del sonido percibido por el observador es pues

$$N_2 = \frac{V + v'}{\lambda}, \quad \text{o} \quad N_2 = N \frac{V - v'}{V}. \quad [3]$$

Se ve que $N_2 > N$, luego: cuando el observador se acerca a la fuente inmóvil, percibe un sonido de frecuencia más grande que la frecuencia real del movimiento vibratorio de la fuente.

Por el contrario, cuando el observador se aleja de la fuente, con una velocidad igual en valor absoluto a (v') la frecuencia percibida es más pequeña que la del movimiento vibratorio de la fuente, o igual a $N \frac{V - (v')}{V}$. Para los dos casos se puede emplear la fórmula (3), con tal que se considere v' como positivo cuando el observador se acerca a la fuente, y como negativo en el caso contrario.

3º Supongamos ahora que la fuente y el observador sean móviles en la recta que los junta, con velocidades respectivamente iguales a v y v' . Estando la fuente en movimiento, las ondas tienen una longitud $\lambda' = \frac{V - v}{N}$; el observador percibe por segundo el número comprendido en la longitud $V + v'$. Luego la frecuencia del sonido que oye es:

$$N' = \frac{V + v'}{\lambda'}, \quad \text{o} \quad N' = N \frac{V + v'}{V - v}. \quad [4]$$

OBSERVACIÓN. — Consideremos los dos casos siguientes: 1º la fuente se acerca al observador inmóvil, con la velocidad v ; la frecuencia percibida es $N_1 = N \frac{V}{V - v}$; 2º el observador se acerca a la fuente con la misma velocidad v ; la frecuencia percibida es $N_2 = N \frac{V + v}{V}$; se ve que N_2 no es igual a N_1 . Luego la altura percibida no depende sólo del movimiento relativo de la fuente respecto del observador. Sin embargo, demuéstrase que si las velocidades v y v' de la fuente y del observador son muy pequeñas con relación a la velocidad de propagación de las ondas V , la frecuencia percibida depende sólo de la velocidad relativa u de la fuente respecto del observador. Conforme a la convención de signos, se tiene, por otra parte, $u = v + v'$.

Demostración. — En efecto, la fórmula (4) puede escribirse:

$$N' = N \frac{1 + \frac{v'}{V}}{1 - \frac{v}{V}} = N \left[1 + \frac{v}{V} + \frac{v'}{V} + \frac{v^2}{V^2} + \frac{vv'}{V^2} + \dots \right]$$

suponiendo v y v' muy pequeños con relación a V , los términos $\frac{v^2}{V^2}$, $\frac{vv'}{V^2}$ son despreciables, y, a fortiori, lo mismo ocurre con los términos siguientes del desarrollo, que son de grado superior al segundo. Luego se puede escribir sensiblemente:

$$N' = N \left(1 + \frac{u}{V} \right), \quad \text{o} \quad N' = N \frac{V + u}{V}.$$

CAPÍTULO V

REFLEXIÓN, REFRACCIÓN E INTERFERENCIAS DE LOS MOVIMIENTOS VIBRATORIOS

424. Reflexión del sonido. — Ecos y resonancias. — Si un observador emite un sonido delante de un obstáculo plano, una pared por ejemplo, en dirección perpendicular a este plano, oye, en general, poco después del sonido inicial, un segundo sonido. Por lo tanto, el muro ha devuelto

el sonido al observador; en este caso dicese que el sonido se refleja. Este fenómeno se llama *eco*.

Tratándose de un sonido muy breve, como un choque, puede haber eco cuando la superficie que lo refleja dista 17 metros. Esto resulta del hecho fisiológico de que una sensación sonora persiste por lo menos una décima de segundo. Como, durante este intervalo de tiempo, el sonido recorre próximamente 34 metros, todo observador, colocado a más de 17 metros del muro, recibirá el sonido reflejado después que la sensación del sonido directo se haya extinguido en él. Sin embargo, un oído acostumbrado percibe distintamente sonidos separados por un intervalo de tiempo de un quinceavo de segundo; entonces el eco distinto ocurre para una distancia de unos 13 metros.

Para sonidos articulados se requiere doble distancia, esto es, 34 metros. Esto se debe a que no se puede pronunciar ni oír distintamente más de cinco sílabas por segundo.

Resonancias. — Cuando la distancia de la superficie reflectora es menos de 34 metros para los sonidos articulados y de 17 para los ruidos aislados, como el sonido directo y el reflejado tienden a confundirse, no es posible oírlos separadamente; pero el sonido es reforzado y se hará tanto más confuso cuanto que irán a agregarse al principal multitud de reflexiones parciales, entonces se dice que hay *resonancia*. Esto es lo que se observa en las habitaciones muy grandes. Las salas desnudas son muy sonoras; por el contrario, las cortinas y tapices, que reflejan mal el sonido, las hacen *sordas*.

Ecos monosilábicos y polisilábicos. — Según lo antedicho, si se habla en alta voz delante de un reflector que diste 34 metros, el eco no repetirá distintamente sino la última sílaba pronunciada; el eco es, pues, *monosilábico*. Si el reflector dista dos veces, tres veces, 34 metros, el eco será *disilábico*, *trisilábico* y repetirá dos o tres sílabas sucesivas.

Ecos múltiples. — Llámense *ecos múltiples* los que repiten varias veces el mismo sonido: así sucede cuando dos obstáculos colocados una frente a otro, dos paredes paralelas por ejemplo, se lanzan sucesivamente el sonido. Hay algunos que repiten hasta veinte o treinta veces la misma voz. Citase en particular el del castillo de Simonetta, cerca de Milán, que repite *cuarenta veces* una palabra pronunciada entre la dos alas paralelas del edificio.

425. *Acústica de las salas.* — En una sala en que se produce un sonido, un oyente puede oír tres clases de vibraciones: 1º las ondas primarias que emanan directamente de la procedencia; 2º las ondas difundidas, en número infinito, que son devueltas por las paredes y producen el sonido de resonancia; 3º las ondas reflejadas directamente por las paredes, que pueden dar lugar a distintos ecos.

Para que sea buena una sala, desde el punto de vista acústico, es preciso que en ella no haya ecos y que el sonido de resonancia sea suficientemente corto para reforzar el sonido que lo ha producido y no unirse al sonido siguiente.

W. Sabine ha estudiado la acústica de las salas, produciendo en ellas el sonido de un tubo de órgano, haciéndolo cesar bruscamente y midiendo el tiempo durante el cual un oyente continuaba oyendo el sonido, después de terminado. Ha estudiado el efecto absorbente de las alfombras, tapices, personas, etc.

Según sus experimentos, la duración del sonido de resonancia está determinada por

la fórmula $t = \frac{K}{a+x}$, donde K es una constante que depende del volumen de la sala (Sabine ha hallado que $K = 0,171 V^{m^3}$); a , el poder absorbente de la sala vacía, y x el poder absorbente de los espectadores. Se calcula el valor de a , determinando el de t en la sala vacía. Buscando, luego, el valor de t , con la sala provista de diversos objetos o llena de espectadores, se pueden determinar los poderes absorbentes de tales objetos o espectadores. De este modo, Sabine da, como poder absorbente de un auditorio, 0,16 por persona, tomando como unidad el poder absorbente de una ventana abierta de $1m^2$ de superficie.

El doctor Marage ha repetido estos experimentos, empleando, como procedencia sonora, su sirena de vocales (452), provista de resonadores bucales, de modo a aproximarse todo lo posible a las condiciones en que se encuentra un orador. Colocábase la sirena en el punto en que de ordinario se sitúa el orador; el oyente se instalaba sucesivamente en distintos puntos de la sala, y determinábase, en segundos, la duración del sonido residuo en cada una de las cinco vocales a , e , i , o , u . Empleábase una energía igual a la que consume un orador regular.

He aquí, algunos resultados obtenidos por el doctor Marage. En el salón del Trocadero, de París, el sonido residuo dura de $1^s,9$ a $2^s,1$, según las vocales, cuando el salón está vacío y desde $1^s,4$ hasta $1^s,5$ cuando se encuentra lleno. Desde el punto de vista acústico, es una sala mala. Un orador, para hacerse entender en ella, tiene que hablar muy despacio, deteniéndose a cada frase; pero no debe hablar con más energía que en una sala de regulares dimensiones. En el gran paraninfo de la Sorbona, la duración del sonido residuo varía, según las vocales, de $1^s,8$ a $2^s,8$ cuando la sala está vacía y de $0^s,9$ a 1^s , cuando está llena. Tan grande diferencia se debe a que el arquitecto tuvo la precaución de suprimir casi por completo las paredes laterales, tapizándolas, en cierto modo, con oyentes. En fin, la mejor de las salas estudiadas por el doctor Marage es la aula de Física de la Sorbona, en que el sonido residuo dura de $1^s,2$ a $1^s,6$ estando vacía la sala, y de $0^s,6$ a $0^s,7$ hallándose llena.

426. Mecanismo de la reflexión de las ondas. — 1º *Reflexión de una sacudida transversal.* — Si se produce una sacudida en un extremo A

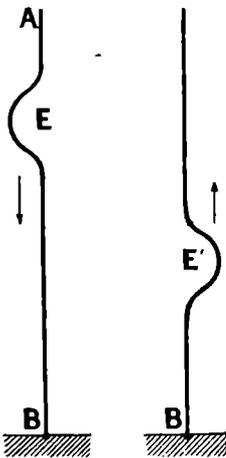


Fig. 417.

(fig. 417) de una cuerda, cuyo otro extremo B está fijo, obsérvese que la sacudida E, después de llegar al punto B, vuelve atrás, y que las elongaciones cambian de sentido.

En este caso, se dice que la sacudida se refleja en B, con cambio de signo de la elongación.

Si la cuerda está libre en su extremo B, nótase que la sacudida se refleja; pero sin cambio de signo de las elongaciones (fig. 418).

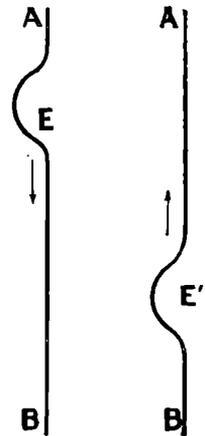


Fig. 418.

2º *Reflexión de los movimientos longitudinales.* — Del mismo modo, si, por un tubo indefinido,

se propaga una compresión, y si el extremo del tubo se halla cerrado por una pared rígida, el aire se comprime contra esta pared y se expande comprimiendo las capas anteriores; entonces propágase otra vez la compresión, en sentido contrario: luego se ha reflejado. Lo mismo se refleja una dilatación.

Es fácil ver que, al mismo tiempo, la reflexión se produce con cambio de signo de la elongación.

Pero si el tubo está abierto, al llegar la compresión a su extremo, el aire se expansiona bruscamente; en este caso a cada compresión, sucede una dilatación, que se propaga en sentido inverso por el tubo. Del mismo modo, si se propaga una dilatación, llegará al tubo una compresión. Pero la reflexión se produce sin cambio de signo en la elongación.

Más adelante (447), veremos que las propiedades de los tubos sonoros confirman estos hechos.

427. Reflexión de las ondas que se propagan en un medio indefinido.

— **Leyes.** — Cuando dos ondas que se propagan en un medio indefinido encuentran un obstáculo plano o curvo, se reflejan según las mismas leyes que las ondas luminosas (470, 663).

Llámanse *ondas incidentes* las ondas que caen sobre el cuerpo reflector y *ondas reflejadas* las que este cuerpo devuelve. Las direcciones de propagación de las ondas incidentes o reflejadas se denominan *rayos incidentes* o *rayos reflejados*.

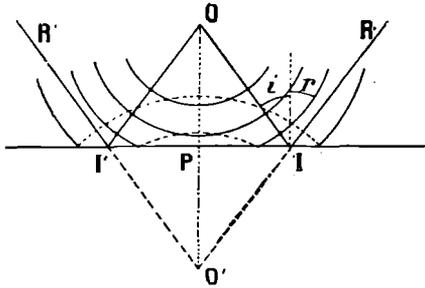


Fig. 419.

A todo rayo incidente, tal como OI (fig. 419), corresponde un rayo reflejado IR. Llámanse *ángulo de incidencia* y *ángulo de reflexión*, a los ángulos que la normal forma con el rayo de incidencia y el rayo de reflexión respectivamente.

con el rayo de incidencia y el rayo de reflexión respectivamente.

LEYES DE LA REFLEXIÓN DEL SONIDO. — Las ondas sonoras se reflejan según las leyes siguientes :

1ª *El rayo reflejado y el incidente están en un mismo plano perpendicular a la superficie reflectora.*

(Este plano, en que se hallan el rayo de incidencia y la normal a la superficie reflectora en el punto de incidencia del rayo, lleva el nombre de *plano de incidencia*).

2ª *El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.*

Luego veremos (471) que estas leyes son las mismas que las de la reflexión de la luz. Se establecen demostrando experimentalmente la exactitud de las consecuencias que de ella se deducen.*

1º *Experimento de los espejos conjugados.* — Se disponen dos espejos cóncavos (484), esféricos o parabólicos, MM' (fig. 420), a algunos metros uno de otro y de modo que coincidan sus ejes principales. Se coloca un reloj en el foco F de uno de ellos y se mueve, ante el espejo M', una trompetilla acústica destinada a recoger las ondas sonoras reflejadas por M'. Aplicase al oído el orificio O del tubo que se adapta a la trompetilla y se oye claramente el tic-tac del reloj, cuando la trompetilla acústica se halla en el foco F' del espejo M', mientras que, si está fuera de F' arriba o debajo, no se le oye.

*. En óptica, desarrollaremos estas consecuencias; pero, por ahora, podemos aprovechar ya algunas.

Veremos que si en F hubiera habido un foco luminoso, los rayos luminosos, reflejados sucesivamente en M y M' se hubieran concentrado también en F' : luego, el movimiento vibratorio que constituye el sonido se refleja con arreglo a las mismas leyes que la luz.

Los rayos sonoros que *divergían* de F , se hacen paralelos entre sí, después de la primera reflexión en M ; luego, al reflejarse en M' , *convergen* hacia el foco F' . Al mismo tiempo, las superficies de onda, que al principio eran superficies esféricas de centro F , se convierten en planos después de la primera reflexión, y después, en la segunda reflexión, se transforman en superficies esféricas de centro F' .

2º *Reflexión del sonido en una bóveda elíptica.* — Sabemos (502) que si

se coloca un punto luminoso en uno de los focos F (fig. 421) de un espejo elíptico, los rayos reflejados

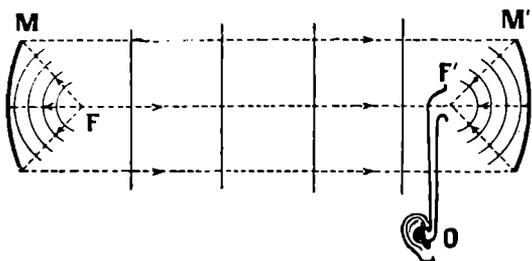


Fig. 420.

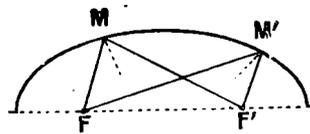


Fig. 421.

por el espejo se reúnen en el otro foco F' , en virtud de la propiedad que tiene la normal a un punto de la elipse de ser bisectriz del ángulo de los radios vectores de ese punto.

Del mismo modo, si en uno de los focos F de una bóveda elíptica se emite un sonido débil, un observador oirá claramente el sonido, si se coloca en el otro foco, pero no lo oirá si se sitúa en cualquier otro punto, aunque esté más próximo a la procedencia sonora.

En el Conservatorio de Artes y Oficios de París, hay una sala cuadrada, de bóveda elíptica, en que se puede observar claramente este fenómeno. Con la misma facilidad puede efectuarse el experimento en las estaciones de sección elíptica del ferrocarril metropolitano de París.

3º *Reflexión de las ondas emitidas por un centro de vibraciones a una superficie plana reflectora.* — Supongamos un centro O de vibraciones (fig. 419), que envía ondas esféricas a una superficie plana reflectora. Sean OI un rayo incidente e IR el rayo reflejado correspondiente. Según la primera ley de la reflexión, el rayo reflejado encuentra a la prolongación de la normal a la superficie plana bajada del punto O . Sea O' este punto de encuentro. Los triángulos OIP y $O'IP$ son iguales; pues tienen iguales los ángulos en P , por ser rectos; el lado PI , común y los ángulos O y O' iguales por serlo respectivamente uno al ángulo de incidencia y otro al de reflexión. Luego $PO' = PO$.

Esta demostración puede repetirse para todos los rayos incidentes. De ahí se deduce que las prolongaciones de todos los rayos reflejados pasan por el punto O' , simétrico de O con relación a la superficie reflectora. Por consecuencia las ondas se reflejan como si procedieran del centro de sacudimiento O .

428. **Demostración de las leyes de la reflexión.** — Supongamos que dos ondas planas caen oblicuamente en una superficie plana reflectora, perpendicular al plano de la figura 422 al que corta según MM' . Sea AB una superficie de onda incidente perpendicular también al plano de la figura. Tomemos un momento cualquiera como origen del tiempo,

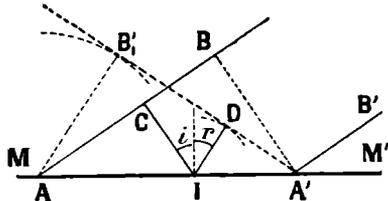


Fig. 422.

El estado vibratorio de los puntos de AB , en el tiempo cero, se hallará en el tiempo t , en un plano $A'B'$ perpendicular al de la figura y tal que $BA' = Vt$, representando por V la velocidad de propagación del movimiento vibratorio. Pero las vibraciones incidentes caen en los distintos puntos de la superficie de separación MM' ; y, por lo tanto, se convierten ellos

mismos en centros de vibración. Así, el punto A , tiene, en el tiempo cero, la fase de los puntos de AB en este mismo momento. Si estuviera solo, transmitiría, al cabo del tiempo t , este estado vibratorio a todos los puntos de una superficie esférica de centro A y de radio $AB' = Vt$.

Cualquier punto, I , de la superficie MM' recibe el estado vibratorio en cuestión, del punto C que es el pie de la perpendicular bajada de I a AB , y al cabo del tiempo $\theta = \frac{CI}{V}$; en el tiempo t , la transmite a una superficie esférica de centro I y radio $(V(t - \theta))$.

En cuanto al punto A' , que no recibe el estado vibratorio en cuestión sino al cabo del tiempo t , no la transmite aún en este mismo momento. Se ve, pues, que, en el tiempo t , los distintos puntos de AA' transmiten, a los distintos puntos de una infinidad de superficies esféricas cuyos radios varían entre Vt y cero, el estado vibratorio que AB tenía al tiempo cero.

Por la intersección del plano $A'B'$ con la superficie de separación MM' tracemos un plano $A'B'$, tangente a la esfera descrita con el radio Vt , tomando por centro A . Bajemos la perpendicular ID a este plano. En los triángulos semejantes $A'DI$, $A'B'A$ tenemos :

$$\frac{DI}{AB'} = \frac{A'I}{A'A} \quad \text{o} \quad \frac{DI}{Vt} = \frac{A'I}{A'A} \quad [1]$$

Y, en los triángulos ACI , ABA'

$$\frac{CI}{A'B} = \frac{AI}{A'A'} \quad \text{o} \quad \frac{CI}{Vt} = \frac{AI}{A'A'} \quad [2]$$

Sumemos miembro a miembro las ecuaciones [1] y [2] :

$$\frac{CI + DI}{Vt} = \frac{A'I + AI}{A'A'} = 1.$$

De donde,

$$\text{Pero} \quad \begin{aligned} CI &= V\theta, & \text{luego} \quad DI &= Vt - CI, \\ & & & DI = Vt - V\theta = V(t - \theta). \end{aligned}$$

Se ve que el punto D pertenece a la superficie esférica de centro I de radio $V(t - \theta)$. Lo mismo se demostraría para todos los puntos de AA' . El plano $A'B'$, es, pues, el envolvente de las superficies esféricas en que los distintos puntos de AA' emiten en el tiempo t , el estado vibratorio que, en el tiempo cero, tenían los puntos de la onda AB . Por consiguiente, $A'B'$, es una nueva superficie de onda; luego tiene que ser la superficie de onda reflejada.

A medida que las ondas incidentes se propagan en la dirección CI , las reflejadas lo efectúan en la dirección ID ; CI e ID representan, pues, un rayo incidente y un rayo reflejado. Se ve que estos rayos están en un mismo plano perpendicular a MM' que es el plano de la figura: lo cual demuestra la primera ley de la reflexión. Por otra parte, los triángulos ABA' y $A'B'A$ son iguales, por tener el lado AA' común y los lados $A'B$ y AB' , iguales por serlo a Vt . Por lo tanto, serán también iguales los ángulos BAA' y $B'A'A$. Pero si se traza en I la normal a MM' , serán iguales el ángulo de incidencia i y el BAA' , por tener sus lados respectivamente perpendiculares. Lo mismo ocurre con el ángulo de reflexión r y el $B'A'A$. Luego el ángulo de incidencia y el de reflexión son iguales, y, por tanto, queda demostrada la segunda ley de la reflexión.

429. **Refracción de las ondas.** — Cuando las ondas pasan de un medio a otro en que la velocidad de propagación es diferente, los rayos sufren un cambio de dirección. Este fenómeno se denomina *refracción* de las

ondas. La figura 423 demuestra cómo se refractan ondas planas al atravesar la superficie de separación plana de un medio y de otro en que la velocidad de las ondas es más pequeña. A todo rayo incidente SI en el primer medio, corresponde un rayo refracto IR en el segundo medio.

Los ángulos i y r que forman respectivamente con la normal el rayo incidente y el refractado se llaman *ángulo de incidencia* y *ángulo de refracción*.

LEYES DE LA REFRACCIÓN. — 1º *El rayo incidente y el rayo refractado están en un mismo plano perpendicular a la superficie de separación de los dos medios (este plano es el plano de incidencia).*

2º *Cuando la dirección del rayo incidente varía, hay una relación constante entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción.*

Estas leyes son las mismas que las de la refracción de la luz (504). Pueden establecerse experimentalmente, para los movimientos vibratorios, comprobando mediante un experimento que el sonido se refracta como lo verifica la luz.

Para esto, basta probar experimentalmente, para el sonido, las consecuencias que, para la luz, se deducen de las leyes de la refracción.

Para el sonido como para la luz, pueden establecerse sistemas refringentes tales como prismas y lentes. Los experimentos efectuados con estos sistemas demuestran que los rayos sonoros siguen las mismas leyes que los rayos luminosos.

Experimento de Sondhaus. — Se cortan dos segmentos iguales de una esfera de colodión y se unen por las dos caras, sujetándolos con un anillo metálico, de manera que formen una lente biconvexa, hueca, la cual se llena de anhídrido carbónico. Colócase un reloj en la dirección del eje, y luego, por el otro lado de la lente, se busca el punto en que se oye con mayor intensidad el ruido del reloj. De este modo, obsérvase que cuanto más lejos del eje se halla del oído, tanto menos perceptible es el sonido; mientras que, a conveniente distancia de la lente, el sonido se oye claramente. Es decir, que hay una especie de *imagen sonora* debida evidentemente a la refracción del sonido.

La figura 424 representa la marcha de los rayos sonoros que emanan de la procedencia P y que, después de refracción, se reúnen en P' . La lente transforma las ondas esféricas de centro P , en ondas esféricas de centro P' .

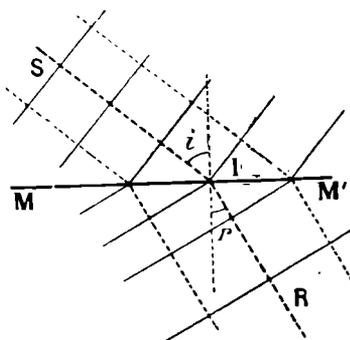


Fig. 423.

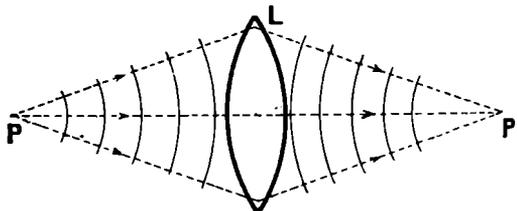


Fig. 424.

430. **Demostración de las leyes de la refracción.** — Sea MM' (fig. 425) la superficie plana de separación de dos medios, sobre la cual caen ondas planas; sea AB una superficie de onda. Suponemos que el plano de la figura es al mismo tiempo perpendicular a la superficie MM' y a las superficies de onda. En el tiempo cero, los puntos de AB tienen un cierto estado vibratorio que, al cabo del tiempo t , se encuentra en el primer medio en los diversos puntos del plano $A'B'$ cuya distancia a AB es $BA' = Vt$, designando por V la velocidad de propagación del movimiento vibratorio en el primer medio.

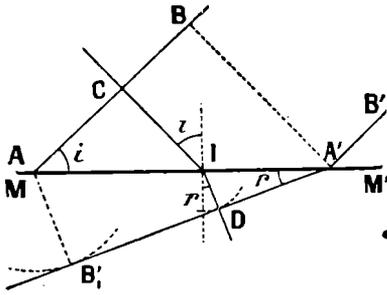


Fig. 425.

El estado vibratorio considerado llega sucesivamente a los diversos puntos de la superficie de separación MM' , que funcionan entonces como nuevos centros de vibración. En primer lugar, en el primer medio, resultan ondas reflejadas que obedecen a las leyes de

la reflexión. Por otra parte, los puntos de AA' transmiten las vibraciones al segundo medio. Llamemos V' a la velocidad de propagación en este segundo medio. Al cabo del tiempo t , el punto A transmite el estado vibratorio que AB tenía en el tiempo cero, a los diferentes puntos de una superficie esférica de centro A y de radio $AB_1 = V't$. Por la intersección del plano $A'B'$ y MM' tracemos un plano tangente a esta esfera, y sea B_1' el punto de tangencia. Llamemos C a un punto de la superficie de onda AB . El movimiento vibratorio que parte de C , al tiempo cero, llega a I , al tiempo θ de modo que se tiene $CI = V\theta$. Desde el punto I , bajemos la perpendicular ID al plano $A'B_1'$.

En los triángulos semejantes $A'B_1'$ y $A'ID$, tenemos

$$\frac{ID}{AB_1'} = \frac{A'I}{AA'} \quad \text{o} \quad \frac{ID}{V't} = \frac{A'I}{AA'} \quad [1]$$

Y, en los triángulos CIA y $BA'A$,

$$\frac{CI}{BA'} = \frac{AI}{AA'} \quad \text{o} \quad \frac{V\theta}{Vt} = \frac{AI}{AA'} \quad [2]$$

Sumando miembro a miembro las igualdades [1] y [2],

$$\frac{ID}{V't} + \frac{\theta}{t} = 1, \quad \text{de donde} \quad ID = V'(t - \theta).$$

El movimiento vibratorio llega a I en el tiempo θ . Al cabo del tiempo t , lo habrá, pues, transmitido, en el segundo medio, a los puntos de una superficie esférica de centro I y de radio $V'(t - \theta) = ID$. Por consiguiente, esta esfera es tangente en D al plano $A'B_1'$. El plano $A'B_1'$ es, pues, envolvente de las superficies esféricas en que los diversos puntos de la superficie MM' envían, después del tiempo t , en el segundo medio, el estado vibratorio que tenían los puntos de AB en el tiempo cero. El plano $A'B_1'$ es, por tanto, la superficie de onda refractada.

Las perpendiculares ID y CI a las superficies de onda refractada e incidente son, pues, la primera un rayo refractado, y la segunda un rayo incidente. Obsérvese que estos rayos se hallan en el plano de la figura, que es perpendicular a la superficie de separación MM' ; lo cual demuestra la primera ley de la refracción.

Además, el ángulo de incidencia es igual al BAA' y, en el triángulo BAA' , tenemos:

$$\text{sen. } i = \frac{BA'}{AA'} = \frac{Vt}{AA'}$$

Del mismo modo, el ángulo de refracción es igual al $AA'B_1'$, y tenemos

$$\text{sen. } r = \frac{AB_1'}{AA'} = \frac{V't}{AA'}$$

Luego

$$\frac{\text{sen. } i}{\text{sen. } r} = \frac{V}{V'}$$

Se ve que la relación $\frac{\text{sen. } i}{\text{sen. } r}$ debe permanecer constante cuando i varía. También puede observarse que dicha relación es igual a la de las velocidades de propagación en los dos medios.

Si, en el segundo medio, la velocidad V' es inferior a la velocidad V del primero, tendremos que $\frac{\text{sen. } i}{\text{sen. } r} > 1$. De donde, $\text{seno } i > \text{seno } r$ y, por consiguiente, $i > r$. Luego el rayo refractado se acerca más a la normal que el rayo incidente.

Por el contrario, si $V' > V$, r es superior a i ; el rayo refractado dista más que el incidente, de la normal.

PRINCIPIO DEL REGRESO INVERSO DE LOS RAYOS. — Si del segundo medio al primero, pasasen ondas planas paralelas a $A'B_1$, tomarían la dirección de las anteriores ondas incidentes AB . En efecto, sean r el nuevo ángulo de incidencia e i , el nuevo ángulo de refracción. Se ha demostrado que

$$\frac{\text{sen. } r}{\text{sen. } i} = \frac{V'}{V} = \frac{\text{sen. } r}{\text{sen. } i}$$

De donde se deduce que $i = i$, lo cual demuestra que si un rayo incidente se presenta según DI en la superficie de separación de los dos medios, se refracta según IC .

Este fenómeno se conoce con el nombre de *Principio del regreso inverso de los rayos*.

INTERFERENCIAS DE LOS MOVIMIENTOS VIBRATORIOS.

431. Fenómenos de interferencias. — Principio de la superposición de los pequeños movimientos. — Supongamos que en un mismo medio se hallan varias procedencias de movimientos vibratorios. Estos movimientos se propagarán simultáneamente en el medio, de manera que un punto de éste estará solicitado a la vez por varios movimientos. Entonces, dícese que estos movimientos *son interferentes* y el fenómeno que se produce se denomina *fenómeno de interferencias*.

Para exponer la teoría de estos fenómenos, admitiremos el principio siguiente, conocido con el nombre de *principio de la superposición de los pequeños movimientos*.

Para obtener la elongación de un punto de un medio en que se propagan varios movimientos de poca amplitud, es preciso sumar geoméricamente las elongaciones que darían los diversos movimientos si cada uno de ellos existiera aislado.

Supongamos, por ejemplo, una molécula M (fig. 426) del medio que, en un momento dado, tendría la elongación MA , si se propagase solo un primer movimiento, y respectivamente, las elongaciones MB , MC , si existiesen solos un segundo y un tercer movimiento. Cuando se propaguen simultáneamente estos tres movimientos, el punto M adoptará la elongación MR , resultante de los vectores MA , MB y MC .

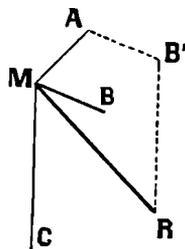


Fig. 426.

Este principio se demuestra por la exactitud de los resultados que de él pueden deducirse.

Caso particular. — Cuando las elongaciones de los movimientos componentes se dirigen según la misma recta, la elongación del movimiento resultante es la suma algébrica de las elongaciones de los movimientos componentes.

En física, son muy numerosos los casos de interferencia de los movimientos vibratorios*.

432. Interferencias de los movimientos directo y reflejado que se propagan por una cuerda. — Tomemos una cuerda larga, sujeta en B (fig. 427) y comuniquemos, con una mano, a su otro extremo, un movimiento transversal. Hacia B , se propagarán varias ondas; pero, en B , se refleja el movimiento vibratorio.

Luego las ondas reflejadas serán interferentes con las directas.

Si el período de oscilación es adecuado, se verá que los puntos equidistantes B , N , N' permanecen en reposo. Estos puntos se llaman *nodos*. Todos los demás puntos de la cuerda vibran; pero con amplitudes

* Por ahora, sólo estudiaremos los fenómenos de interferencias referentes a la acústica; pero, en óptica, tendremos ocasión de exponer otros fenómenos notables de interferencias (664).

desiguales. Los que vibran con mayor amplitud son los puntos V y V', situados a igual distancia de dos nodos consecutivos. Estos puntos V y V' se denominan *vientres de vibración*.

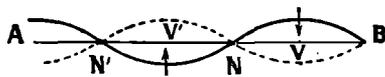


Fig. 427.

Finalmente, toda la cuerda entera pasa alternativamente de la posición figurada en línea llena a la figurada con puntos, de tal modo que a ambos lados del nodo, los movimientos de las puntas de la cuerda son siempre de sentido contrario.

Las porciones de cuerda comprendidas entre dos nodos consecutivos se llaman *concameraciones*.

También se dice que se forma, en la cuerda, un *sistema de ondas estacionarias*.

Explicación del fenómeno. — Si el punto B no fuera fijo y si la cuerda fuese indefinida, ésta, en un momento dado, tendría la forma de una senoide 11' (fig. 428).

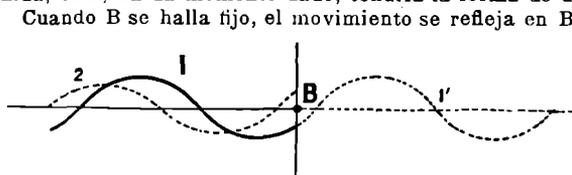


Fig. 428.

Cuando B se halla fijo, el movimiento se refleja en B, con cambio de signo en la elongación. Es decir, que si el movimiento reflejado existiera solo, se tendría elongaciones de los diversos puntos de la cuerda en el momento considerado, tomando la senoide simétrica de 1' con relación a B y cambiando el signo a todas las ordenadas. De este modo se obtiene la senoide 2. Y, según el principio precedente, la elongación de cada punto de la cuerda, en el movimiento resultante, se obtendrá sumando algebricamente las ordenadas de las sinusoides 1 y 2, en cada punto de la cuerda. Consideremos los diversos casos particulares que pueden presentarse.

En un momento que tomaremos como origen del tiempo, la senoide 1 tiene la posición indicada en (1) (fig. 429).

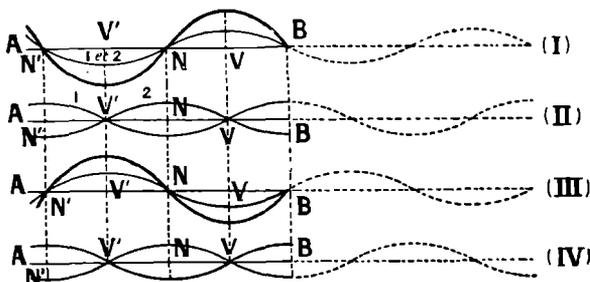


Fig. 429.

Es fácil ver que la senoide 2 está superpuesta a la 1. Por tanto, la cuerda tiene, en realidad, la forma de una senoide cuyas ordenadas son dos veces mayores que las de la senoide 1.

Un cuarto de periodo después, en el tiempo $\frac{T}{4}$, la senoide 1 adapta la posición figurada en (II) y la senoide 2 le es simétrica con relación a AB. De ahí se deduce que cada punto de la cuerda está solicitado por dos movimientos que tienden a proporcionarle dos elongaciones iguales y de signos contrarios. Todos los puntos de la cuerda están, pues, en ese momento, en su posición de equilibrio.

Al cabo del tiempo $\frac{T}{2}$, la senoide 1 tiene la posición indicada en (III) y se le superpone la senoide 2. La cuerda tiene la forma de una senoide de ordenadas dobles que las de la curva 1.

Después del tiempo $\frac{3T}{4}$, las dos sinusoides 1 y 2 se hallan de nuevo en posiciones simétricas y la cuerda está toda ella en su posición de equilibrio.

Finalmente, en el tiempo T, las diversas curvas vuelven a la posición que tenían en (I). Se ve, pues, que el punto, B que está fijo, y los puntos N, N',..., que son tales que

$BN + NN' = \dots = \frac{\lambda}{2}$. permanecen siempre en reposo. Los demás puntos de la cuerda están, por lo contrario, en vibración, y los puntos V, V', \dots , situados a igual distancia de dos nodos consecutivos, vibran con la amplitud máxima.

Esta amplitud es el duplo de la amplitud del movimiento vibratorio que efectuaría cada punto de la cuerda si no hubiese reflexión.

Caso de un extremo libre. — El caso de un cuerpo rectilíneo vibrante, con uno de sus extremos libre, puede realizarse fácilmente por medio de una varilla elástica sujeta en uno de sus extremos por un torno (fig. 430).

En este caso, toda vibración transversal que se comunica a un punto, se propaga y refleja en la extremidad libre; pero sin que cambie de signo la elongación.

Mediante análogo razonamiento, se demostraría que el cuerpo vibrante se divide también en concameraciones; pero que *el extremo libre B es un vientre*. Las distancias sucesivas de los vientres entre sí son también iguales a una semilongitud de onda. El primer nodo N está a un cuarto de

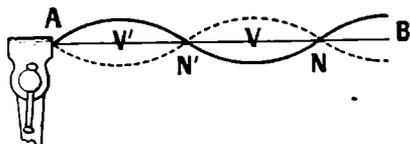


Fig. 430.



Fig. 431.

longitud de onda del extremo y las distancias de los nodos sucesivos son siempre iguales a una semilongitud de onda.

OBSERVACIÓN. — Para que sobre una cuerda o una varilla vibrante se establezca un sistema fijo de ondas estacionarias, el período de vibración no puede tener cualquier valor. Supongamos, por ejemplo, una cuerda sujeta por sus dos extremos. Estos extremos no pueden, evidentemente, ser más que nodos. Por consiguiente es preciso que comprendan entre sí un número entero de semilongitudes de onda. Si el período de la vibración que se da a la cuerda no responde a esta condición no se puede establecer sistema fijo de ondas estacionarias.

Asimismo, si la varilla está fija por uno de sus extremos, hallándose libre el otro, el extremo fijo tiene que ser un nodo y el libre, un vientre.

Para que un sistema de ondas estacionarias quede establecido es, pues, necesario, que la longitud de la varilla comprenda un número impar de veces la cuarta parte de una longitud de onda.

Teoría algebraica. — Supongamos una cuerda fija por uno de sus extremos B (fig. 431), y que un movimiento vibratorio transversal de período T se propaga de A a B y se refleja en B. Sea

$$s = a \text{ sen. } 2\pi \frac{t}{T}$$

la elongación del movimiento que tendría B si existiera solo el movimiento directo.

La elongación del movimiento reflejado debe ser tal que el punto B permanezca siempre en reposo. Por tanto, esta elongación debe estar representada, en B, por la ecuación :

$$s' = - a \text{ sen. } 2\pi \frac{t}{T}$$

Consideremos un punto M de la cuerda, situado a una distancia d de B. El movimiento vibratorio se propaga a lo largo de la cuerda con una velocidad que designaremos por V : emplea pues, un tiempo $\frac{d}{V}$ en ir de M a B. El movimiento directo en M tiene, por tanto, un avance de $\frac{d}{V}$ sobre el movimiento directo de B. Por consiguiente, la elongación del movimiento directo en M, está representada por la ecuación

$$s_1 = a \text{ sen. } 2\pi \frac{t + \frac{d}{V}}{T} = a \text{ sen. } 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{d}{\lambda} \right).$$

El movimiento reflejado tiene, al contrario, en M, un retraso de $\frac{d}{V}$ sobre el movimiento reflejado en B. Luego la elongación de este movimiento reflejado en M es

$$s'_1 = - a \text{ sen. } 2\pi \frac{t - \frac{d}{V}}{T} = - a \text{ sen. } 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{\lambda} \right).$$

La elongación del movimiento resultante de M es, pues,

$$S = s_1 + s_1' = a \left[\text{sen. } 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{d}{\lambda} \right) - \text{sen. } 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{d}{\lambda} \right) \right].$$

Transformando en producto esta suma de senos mediante la fórmula conocida, tendremos :

$$S = 2a \text{sen. } 2\pi \frac{d}{\lambda} \cos. 2\pi \frac{t}{T}.$$

El punto M vibra, pues, con una amplitud $A = 2a \text{sen. } 2\pi \frac{d}{\lambda}$. Se ve que para los valores $d = 0, d = \frac{\lambda}{2}, d = \lambda, d = \frac{3\lambda}{2}$ y, en general, $d = K \frac{\lambda}{2}$ (siendo K número entero), $A = 0$, es decir, que los puntos en los cuales se cumple esta condición no vibran. Estos son los nodos que la experimentación y la teoría geométrica nos han revelado.

Al contrario, si $d = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}$ o, en general, $d = (2p - 1) \frac{\lambda}{4}$ (siendo p número entero) $A = 2a$, es el valor máximo de la amplitud, que es doble de la del movimiento directo. Los puntos que satisfacen esta condición son los vientres.

Para tratar el caso de un extremo libre, bastaría expresar que las dos elongaciones, directa y reflejada, s y s' , en el extremo libre, son iguales y de igual signo. Se encontrarían los nodos y vientres en la forma que ya hemos indicado.

433. Interferencias de los movimientos vibratorios longitudinales. — Imaginemos que un movimiento vibratorio se propague por un tubo lleno de aire cuyo extremo se halle cerrado por un tabique rígido, o bien abierto al aire.

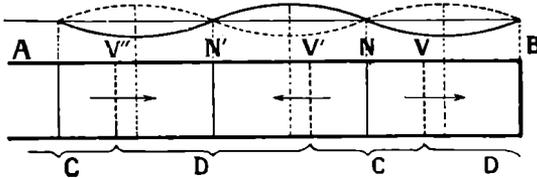


Fig. 432.

El movimiento se refleja según el caso, con cambio o sin cambio del signo de la elongación, y el movimiento reflejado es interferente con el directo. Si el período del movimiento es apropiado, se producirá un sistema de ondas estacionarias en el tubo. Todo lo que hemos dicho respecto de

una cuerda que efectúe vibraciones transversales, se puede aplicar a las vibraciones longitudinales en un tubo. Las mismas figuras pueden servirnos, a condición de convenir en que las ordenadas de las sinusoides representan las elongaciones longitudinales de las diversas secciones del tubo.

La figura 432 representa el caso de un tubo cerrado en B. Este extremo cerrado es un nodo. Los demás nodos distan sucesivamente del extremo $\frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}, \dots$

Los vientres se hallan a las distancias sucesivas $\frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots$ del extremo cerrado.

La figura indica el estado del tubo en el momento en que las secciones vibrantes han alcanzado sus elongaciones máximas. V V' V'' y representan las actuales posiciones, de 3 vientres consecutivos. En CC', se ven las regiones en que se comprime el aire del tubo y, en DD', las en que se dilata. Las flechas representan el sentido de los movimientos que adquieren las secciones del tubo.

OBSERVACIONES. — 1ª Los nodos permanecen siempre inmóviles; pero la presión varía en ellos constantemente. En efecto, ahí es donde está siempre el máximo de dilatación y compresión; pero, si, en un momento dado, presenta un nodo un máximo de compresión, un semiperíodo después, reinará en él una dilatación máxima.

En los vientres, en cambio, no hay variaciones de presión. En efecto, si se consideran dos secciones de aire muy próximas y situadas a uno y otro lado de un vientre, se ve fácilmente que tendrán, en cualquier momento, la misma elongación. Por consiguiente, durante todo el movimiento permanecen a distancia invariable uno de otro, y la presión de la masa de aire que comprenden, tampoco varía.

2ª El caso de interferencia que se encuentra en un tubo cerrado se produce también cuando se emite un sonido delante de una pared plana. Si la procedencia sonora está suficientemente alejada de la pared, se puede considerar que las superficies de ondas son planas. Las ondas reflejadas producen entonces interferencia con las ondas directas, y delante de la pared se originan planos nodales, el primero de los cuales está a una semilongitud de onda de dicha pared. Entre los planos nodales, y a distancias iguales, se encuentran los planos ventrales, en donde tienen amplitud máxima los movimientos

del aire. Si se mueve el oído perpendicularmente a la pared, se observa, en efecto, alternativas de disminución y de aumento de la intensidad del sonido. Esto experimento se debe a Savart. Es de notar que *el oído percibe el sonido máximo cuando está en un nodo*, esto es, en un lugar en que la presión varía. Por el contrario, el sonido es débil en los vientres, porque en ellos no varía la presión y la membrana del tímpano no puede ponerse allí en movimiento.

Experimento de la trombona de Kœnig. — El siguiente aparato (fig. 433) debido a Kœnig hace ver un caso muy claro de interferencia sonora.

Se compone de un tubo bifurcado O, B, B'. A; delante del extremo O se puede hacer vibrar un diapasón; en A se aplicará el oído*. El tubo B puede alargarse o acortarse a voluntad. Si las longitudes de B y B' son iguales, los movimientos que transmiten y que parten concordantes en

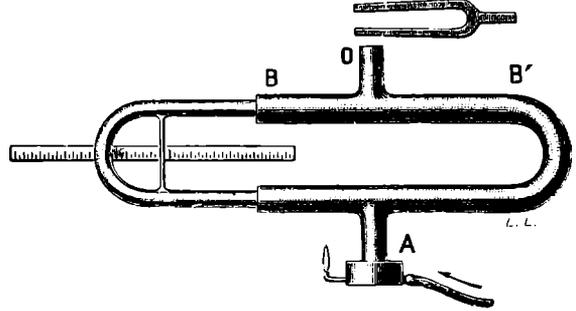


Fig. 433.

O, llegan concordantes a A y se agregan : óyese un sonido intenso. Si se alarga B un cuarto de longitud de onda, el camino OBA será más largo de una semilongitud de onda que el camino OB'A; los movimientos, concordantes en O, llegarán discordantes a A, y se destruirán : se oirá un sonido débil. El primer caso se reproducirá cuando las longitudes de OBA y de OB'A difieran en un número entero de longitudes de onda, y el segundo, cuando difieren en un número impar de semilongitudes de onda. El aparato puede servir para medir la longitud de onda de un sonido.

434. Interferencias de dos movimientos vibratorios de período diferente. — **Pulsaciones.** — Cuando dos sonidos que difieren muy poco en elevación se producen simultáneamente, obsérvanse, a más de la impresión desagradable que resulta de su disonancia, *reforzamientos y debilitaciones periódicas* muy claras. Se da el nombre de *pulsaciones* sobre todo a los primeros. Este fenómeno fué descubierto por Sauveur.

Se ha descubierto por experiencia que el número de estas pulsaciones por segundo *es igual a la diferencia de los números de vibraciones* de los dos sonidos.

Si en un momento dado las dos ondas que llegan al oído son concordantes, las impresiones se agregan; pero no siendo iguales los períodos, al cabo de cierto tiempo uno de los sonidos habrá dado una vibración simple más que el otro y las ondas que lleguen al oído serán discordantes, las impresiones producidas se restarán. Al cabo de un intervalo de tiempo igual al primero, como el sonido más alto ha hecho esta vez una vibración completa más que el otro, las dos ondas serán otra

* Se puede reemplazar el oído por el dispositivo de la cápsula manométrica de Kœnig que describiremos después (447) y que está representado en la figura 433.

vez concordantes, etc.; luego se tendrá una serie de reforzamientos y de debilitaciones que se sucederán a intervalos de tiempos iguales. Sean n , n' las frecuencias respectivas de los dos sonidos; conforme a lo que precede habrá $n - n'$ reforzamientos y debilitaciones por segundo.

Si n y n' están próximos, difieren en una fracción, de $\frac{1}{p}$ por ejemplo; los reforzamientos distarán p segundos. Así se tiene un medio de realizar el unísono con mucha perfección.

En efeto, se reconoce que dos sonidos se aproximan mucho al unísono cuando producen pulsaciones muy separadas al hacerlos oír simultáneamente.

CAPÍTULO VI

VELOCIDAD DEL SONIDO

435. Medida de la velocidad del sonido en el aire. — La medida de la velocidad del sonido en el aire ha sido objeto de numerosos experimentos, de los cuales, los antiguos se fundaban en el principio siguiente.

Colocábanse dos grupos de observadores, en dos estaciones elevadas, visibles una de otra. Se operaba de noche. En cada estación, y con intervalos iguales de tiempo, disparábase un cañonazo. En la otra estación, se notaba, con un cronómetro, el tiempo transcurrido entre la aparición del fogonazo y la audición del sonido. Este tiempo podía considerarse como rigurosamente igual al que empleaba el sonido en salvar la distancia entre ambas estaciones, a causa de la extremada velocidad de la luz (300 000 km. por segundo).

Dividiendo la distancia de las dos estaciones por el tiempo así medido, se calculaba la velocidad del sonido.

El viento ejerce influencia en la velocidad del sonido. Si sopla en la dirección de propagación, su velocidad se suma a la del sonido. Si lo hace en sentido contrario, se resta su velocidad de la del sonido. Por eso, en los experimentos, tomábase como medida del tiempo empleado por el sonido en franquear la distancia de las dos estaciones, con aire en calma, la media del tiempo que tardaba en efectuar el trayecto en los dos sentidos.

De este modo operó una Comisión de miembros de la oficina de longitudes, en 1822, entre Villejuif y Montlhéry.

Experimentos de Regnault. — Regnault ideó sustituir el método de observación directa por el de inscripción gráfica. Así se eliminaban los errores posibles debidos al observador. Realizó numerosos experimentos, unos al aire libre, en el polígono de Satory, otros en tubos para cañerías de agua y gas.

Principio del método. — El método consiste en producir, en un cilindro registrador, la inscripción de la salida y llegada del sonido. En el mismo cilindro se registran al mismo

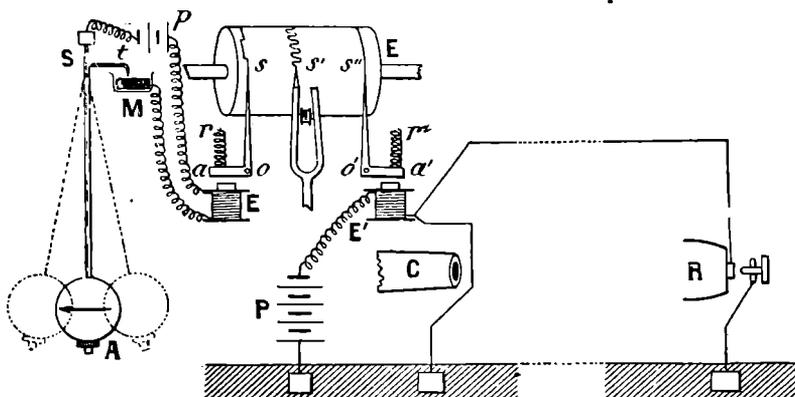


Fig. 431.

tiempo las vibraciones de un diapasón y las oscilaciones de un péndulo (395). Tomemos como ejemplo un experimento efectuado al aire libre. La procedencia sonora era un cañón C (fig. 434), ante cuya boca pasaba un alambre que formaba parte del circuito de una pila P y de un electroimán E' dispuestos como indica la figura. La armadura del electroimán llevaba un estilo s'. En el momento de disparar el cañonazo, cortábase el alambre y, como la armadura dejaba de ser atraída, el estilo retrocedía bruscamente hacia la izquierda (punto a de la inscripción (fig. 435). El sonido llegaba a la estación receptora, donde las ondas sonoras eran recogidas en un pabellón R, terminado en una membrana que contenía una tecla metálica que tropezaba con una punta también metálica.

Este contacto cerraba de nuevo, durante un momento, el circuito de la pila y del electroimán, como fácilmente se comprenderá por la disposición de la figura. Como la membrana se agitaba cierto tiempo, el estilo trazaba algunas sinuosidades, de las cuales la primera b indicaba el momento preciso de la llegada del sonido (fig. 435).

Bastaba trazar, luego, generatrices del cilindro por los puntos a y b y contar el número de segundos y de fracciones de segundo inscritos entre estas dos generatrices, para obtener el tiempo empleado por el sonido en recorrer la distancia CR.

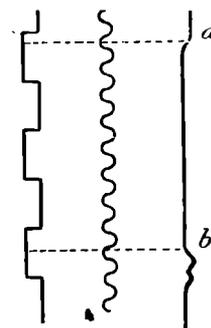


Fig. 435.

Experimentos de Violle y Vautier. — Estos físicos hicieron también experimentos análogos a los de Regnault y con el mismo método en cañerías que se estaban poniendo en Grenoble, y estudiaron las velocidades de los sonidos de diferentes procedencias: sonido brusco de un tiro de pistola, sonidos musicales de diversos instrumentos, etc.

En el primer caso notaron que la velocidad, mayor en los primeros instantes, tiende hacia un límite a medida que disminuye la intensidad. En el segundo, notaron que la velocidad del sonido no depende de su altura, como lo habían indicado otros experimentadores.

Resultados. — Estos experimentos, hechos con mayor precisión que los precedentes, probaron que la velocidad del sonido en el aire seco a 0° es de 331,36 metros por segundo.

436. **Velocidad del sonido en los gases distintos del aire.** — La velocidad del sonido en gases distintos del aire ha sido objeto de algunos

experimentos directos de Regnault. Operaba, éste, con gases contenidos en largos tubos.

Estos experimentos directos eran difíciles, por lo cual se trató de medir la velocidad del sonido en un gas cualquiera, por métodos indirectos que permitiesen compararlo con la velocidad, ya conocida, que tiene en el aire.

Método de Kundt. — Kundt utilizó los fenómenos de las ondas estacionarias producidos en tubos llenos de gas. Un tubo largo AB (fig. 436) se halla cerrado en su extremo A por un tapón móvil que se puede mover en su interior. El otro extremo B se halla provisto de otro tapón que atraviesa libremente una varilla metálica CD apretada en su

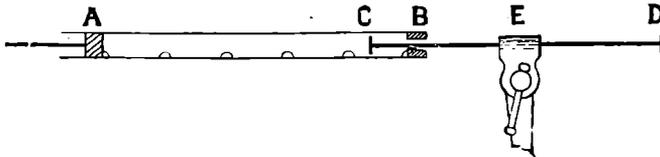


Fig. 436.

centro E por un tornio y que contiene en C un disco de diámetro algo menor que el del tubo.

En el tubo AB, se introduce un polvo ligero, polvos de licopodio o de corcho, y se llena del gas estudiado.

Se hace que la varilla efectúe vibraciones *longitudinales*, frotándola con un trapo de lana impregnado de colofonia. Entonces, aquélla produce un sonido agudo y el disco C pone en vibración a la columna gaseosa AB. Si la longitud AB comprende un número entero de semilongitudes de onda del sonido emitido en el tubo, este último es el sitio donde residen las ondas estacionarias. El polvo deja los vientres y va a reunirse, en montoncitos, en los nodos. Para conseguir este resultado, hay que colocar convenientemente el tapón A. Entonces, es fácil medir la longitud de onda λ del sonido en el tubo,

porque la distancia de dos montones de polvo es $\frac{\lambda}{2}$. Para tener exactamente $\frac{\lambda}{2}$, mídese la distancia de dos montones de polvo que se hallen tan separados como sea posible y se divide esta distancia por el número de concameraciones que comprende.

De igual modo se mide la longitud de onda λ' del mismo sonido en el aire. Se puede operar simultáneamente aprovechando el extremo D de la varilla. Para lo cual, se introduce este extremo en un tubo dispuesto como AB; pero que contenga aire. Sean V la velocidad desconocida del sonido en los gases; V' su velocidad en el aire; T, su período; tendremos:

$$\lambda = VT \quad \text{y} \quad \lambda' = V'T.$$

De donde:

$$\frac{V}{V'} = \frac{\lambda}{\lambda'}.$$

Esta fórmula permite calcular la velocidad V del sonido en el gas; puesto que se conoce la velocidad V' en el aire.

437. Leyes de la velocidad del sonido en los gases. — Los experimentos efectuados en el aire y en otros gases han dado los principales resultados siguientes:

1º *La velocidad del sonido en un gas es independiente de la presión del gas.*

2º *La velocidad del sonido en un gas es proporcional a la raíz cuadrada del binomio de dilatación e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad del gas.*

Expresión algébrica. — Sea V la velocidad del sonido, a la temperatura t , en un gas cuya densidad con relación al aire sea d . Tenemos:

$$V = V_0 \sqrt{\frac{1 + \alpha t}{d}}, \quad \dots$$

representando por V_0 la velocidad del sonido en el aire seco a 0° (o sea 331,10 m. por segundo). En efecto, para el aire seco a 0° se debe hacer, en la fórmula, $t = 0$, y $d = 1$; y en estas condiciones se halla $V = V_0$

Luego la velocidad del sonido en un gas se calculará por la fórmula :

$$V = 331,36 \sqrt{\frac{1 + \alpha t}{d}},$$

o en unidades CGS,

$$V = 33,360 \sqrt{\frac{1 + \alpha t}{d}}.$$

En el aire seco a t° la velocidad es simplemente

$$V' = 331,36\sqrt{1 + \alpha t} \text{ m. por segundo, o } V' = 33360\sqrt{1 + \alpha t} \text{ cm. por segundo.}$$

Pero, para el aire húmedo, hay que introducir la densidad d del aire húmedo con relación al aire seco.

438. Velocidad del sonido en los líquidos. — La velocidad del sonido en el agua fué determinada por un experimento directo de Colladon y Sturm, efectuado en 1827, en el lago de Ginebra.

Experimento de Colladon y Sturm. — Los dos observadores se colocaban en dos lanchas a distancia conocida. La primera lancha llevaba una campana sumergida en el agua y a la que se podía golpear con un martillo. La palanca que movía el martillo, movía también una mecha que prendía fuego a un montón de pólvora, en el mismo momento en que el martillo pegaba. El otro observador aplicaba el oído a una trompetilla cuya bocina provista de una membrana, estaba sumergida en el agua, y apuntaba el intervalo de tiempo transcurrido entre el momento que veía el fogonazo y el en que oía el sonido de la campana. Dividiendo la distancia de las dos lanchas por el tiempo se tenía la velocidad. Encontraron 1435 m. por segundo, a la temperatura de $8^\circ,1$.

En los demás líquidos, la velocidad del sonido puede deducirse del estudio de sus propiedades elásticas.

439. Velocidad del sonido en los sólidos. — La velocidad del sonido en los sólidos varía según que las vibraciones sean transversales o longitudinales. Su estudio no ha dado lugar más que a un pequeño número de experimentos directos. Biot lo ha estudiado en el hierro colado, para las vibraciones longitudinales, del modo siguiente.

1º Experimento de Biot. — Empleaba un largo tubo de hierro colado que debía servir para cañería de agua, y de longitud D conocida. Producíase un sonido en uno de sus extremos, y se oían sucesivamente dos, en el otro extremo. El primero era transmitido por el hierro y el segundo, por el aire, porque la velocidad del sonido es menor en éste que en aquél. Determinábase el intervalo de tiempo t que separaba ambos sonidos. Si llamamos V a la velocidad del sonido en el aire y x a la velocidad del sonido en el hierro colado, tendremos, evidentemente ;

$$t = \frac{D}{V} - \frac{D}{x};$$

de donde se extrae el valor de x .

De este modo, halló Biot que el sonido se propaga 10 veces y media más rápidamente en el hierro que en el aire.

2º La velocidad del sonido en los demás sólidos ha sido calculada (basándose en las propiedades elásticas de los cuerpos considerados) por Chladni, Savart, Masson y Wertheim.

3º *Método de Kundt.* — El método de Kundt permite comparar la velocidad del sonido en un sólido a la que tiene en el aire. Para esto, basta tomar en este experimento una varilla construida con el cuerpo sólido que se quiera estudiar. Puesto que se halla libre en sus dos extremos y sujeta en el centro, es debido a que los dos extremos son *vientres de vibración*. La longitud de la varilla, en el mayor sonido que ésta puede emitir, es, pues, igual a la semilongitud de onda $\frac{\Lambda}{2}$ del sonido en el sólido. De este modo, se obtiene la longitud de onda Λ . Por el mismo experimento obtiéndose también la longitud de onda λ del mismo sonido en el aire. La relación $\frac{\Lambda}{\lambda}$ da la relación de la velocidad del sonido en el sólido a la velocidad del sonido en el aire.

CAPÍTULO VII

CUERDAS Y TUBOS SONOROS

CUERDAS SONORAS

440. **Cuerdas vibrantes.** — **Sonómetro.** — Llámense *cuerdas* en acústica unos cuerpos filiformes, de metal o de tripa, que son *elásticos por tensión*.

Provócanse en las cuerdas dos clases de vibraciones : unas *transversales*, que se efectúan en una dirección perpendicular a aquéllas; otras *longitudinales*, en el sentido de su longitud. Las primeras se provocan,

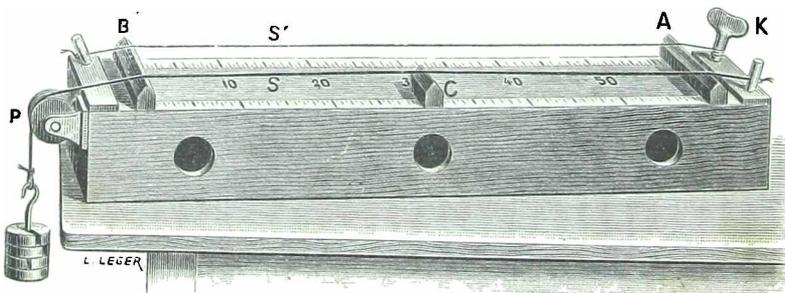


Fig. 437.

sea frotando las cuerdas con un arco, como en el violín, sea pulsándolas, como en el arpa o la guitarra. Cuanto a las longitudinales, se obtienen frotando las cuerdas en el sentido de su longitud con un pedazo de tela espolvoreado con colofonia. Las vibraciones longitudinales son siempre

de mayor frecuencia que las vibraciones transversales. Sólo estudiaremos estas últimas, que son las únicas que se emplean en los instrumentos musicales.

Sonómetro. — El *sonómetro* es un aparato que sirve para estudiar las vibraciones transversales de las cuerdas.

Compónese de una caja sonora de madera delgada, que tiene por objeto reforzar el sonido. En esta caja hay dos caballetes fijos A y B (fig. 437), que distan entre sí un metro. Entre ellos se coloca una escala dividida en milímetros. Un extremo de las cuerdas sometidas al estudio se ata en una clavija fija y el otro en otra giratoria K, o bien se pasa la cuerda por una polea P cargada de un peso. De este modo, se le puede dar la tensión que se quiera, bien dando vueltas a la clavija, bien cambiando los pesos.

441. Leyes de las vibraciones transversales. — Ley de las longitudes. — La frecuencia del movimiento vibratorio producido por una cuerda depende de su longitud, de su diámetro, de la tensión que se le dé y de su densidad.

La *ley de las longitudes* es la única que puede establecerse exactamente por experimentación.

LEY DE LAS LONGITUDES. — *El número de vibraciones que ejecuta una cuerda en un segundo, siendo constante la tensión, varía en razón inversa de su longitud.*

Para establecer esta ley se hace vibrar una de las cuerdas del sonómetro, dándole diversas longitudes mediante un caballete C. Si, después de haber hecho vibrar la cuerda en toda su longitud, se reduce ésta a la mitad, se ve que el sonido emitido sube a la octava; es decir que la cuerda da un número doble de vibraciones. Por otra parte, si se le dan longitudes que estén en razón inversa de los intervalos de la gama, es decir $1, \frac{8}{9}, \frac{4}{5}, \frac{3}{4}, \frac{2}{3}, \frac{3}{5}, \frac{8}{15}$ y $\frac{1}{2}$, se obtienen sucesivamente todas las notas de la gama.

Esta ley se utiliza en los instrumentos de música. Por ejemplo, en el violín, se varía, con el dedo, la longitud de la parte vibrante de la cuerda, para producir diversas notas con esta sola cuerda.

Otras leyes. — Las demás leyes de las vibraciones de las cuerdas se han descubierto por teoría (443). Sin embargo, los experimentos pueden comprobarlas; pero no muy perfectamente, a causa de la imposibilidad de conocer exactamente su tensión.

LEY DE LAS TENSIONES. — *A longitud constante, el número de vibraciones de una misma cuerda, por segundo, es proporcional a la raíz cuadrada de la tensión.*

Si se estiran en el sonómetro dos cuerdas idénticas, por pesos 1 y 4, la segunda da la octava de la primera; de donde se deduce que los números de vibraciones son entre sí como los números 1 y 2, es decir, como las raíces cuadradas de las tensiones. Si se estiran con pesos 4 y 9, la segunda produce la quinta del sonido emitido por la primera.

LEY DE LAS DENSIDADES LINEALES. — Llámase *densidad lineal* de una

cuerda *la masa de la unidad de longitud de dicha cuerda*. Sí, por ejemplo, m gr. es la masa total de la cuerda, de longitud l cm, la densidad lineal es $\mu = \frac{m}{l}$. La teoría y el experimento demuestran la ley siguiente :
Siendo iguales la longitud y la tensión, el número de vibraciones de una cuerda por segundo es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad lineal de la cuerda.

Sí, por ejemplo, se colocan en el sonómetro dos cuerdas de igual longitud y estiradas por el mismo peso, pero diferentes por su diámetro y por su substancia, o por ambas cosas a la vez, y si la masa de la primera es 4 veces mayor que la de la segunda, el sonido que emite está en la octava grave del sonido emitido por la segunda, es decir que el número de vibraciones de la primera es dos veces menor que el de la segunda.

Si designamos por r el radio de la sección de la cuerda y por d la densidad absoluta de su substancia, se tiene $\mu = \pi r^2 d$, de donde $\sqrt{\mu} = \sqrt{\pi} r \sqrt{d}$. De la ley que precede se pueden deducir las dos siguientes, probadas por el experimento.

LEY DE LAS DENSIDADES. — *En igualdad de circunstancias, el número de vibraciones de una cuerda varía en razón inversa de la raíz cuadrada de su densidad.*

LEY DE LOS DIÁMETROS. — *En igualdad de circunstancias, el número de vibraciones varía en razón inversa del diámetro de la cuerda, o de su radio.*

Por ejemplo, si se estiran igualmente, en el sonómetro, dos cuerdas de igual sustancia, cuyos diámetros estén en la relación de 2 a 3, se observa que la más delgada da la quinta de la primera. Si la relación de los diámetros es 2, la cuerda más delgada produce la octava del sonido emitido por la más gruesa.

442. Armónicos. — Si se hace vibrar una cuerda, punteándola en su centro, vibra como indica la figura 438, pasando de la posición figurada con trazo lleno a la figurada con la línea de puntos.

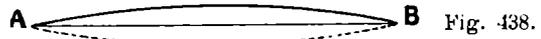
En este caso, el centro de la cuerda es un *vientre*; pues es el punto de la cuerda que efectúa vibraciones de mayor amplitud. Los extremos fijos A y B, que no vibran, son *nodos*.

Pero, si se sujeta ligeramente, por medio de un caballete, el centro de la cuerda vibrante, y se puntea una de sus mitades, vibra; pero su centro permanece fijo (fig. 439). En este caso, el centro es un *nodo*, y la cuerda presenta tres nodos y dos vientres. También se dice que la cuerda está dividida en dos *concameraciones*, mientras que, en el primer caso, sólo comprendía una. Al mismo tiempo, según la ley de las longitudes, la cuerda produce un sonido que está en la octava del sonido llamado *fundamental*, que produce aquella vibrando en toda su longitud.

De la misma manera, si se apoya un caballete en la tercera parte de la cuerda (fig. 440) y si se hace vibrar la porción AD, con un arco, la otra porción, DB, se subdivide *espontáneamente* en dos partes DE, EB, que vibran por separado, permaneciendo sensiblemente fijo el punto E. En efecto, si se colocan trozos de papel, uno en E, otro entre D y E y

un tercero entre E y B, el que se halla en E no experimenta sino un ligero movimiento, mientras que los otros dos son proyectados bastante lejos. Hay, pues, un nodo en el primer punto y vientres en los otros dos.

Si el caballete se encuentra en la cuarta parte de la cuerda, se producen tres nodos y cuatro vientres entre A y B (fig. 441); si está en la quinta parte, se forman, entre los mismos puntos, cuatro nodos y cinco vientres y así sucesivamente.



Al mismo tiempo, obsérvase que los sonidos emitidos producen números de vibraciones 2, 3, 4, 5 veces mayores que el sonido fundamental. Estos son los *armónicos* (409) del sonido fundamental. Además, veremos (451) que cuando se puntea una cuerda de un modo cualquiera, siempre se superponen varios armónicos al sonido fundamental.

443. **Fórmulas de las cuerdas vibrantes.** — Todas las leyes fundamentales de las cuerdas sonoras están contenidas en las fórmulas siguientes.

La frecuencia n_1 del sonido fundamental tiene por expresión

$$n_1 = \frac{2}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}}, \quad [1]$$

donde l representa la longitud de la cuerda (en cm.), F la tensión (en dinas), μ la masa (en gr.) de la unidad de longitud.

Reemplazando μ por $\pi r^2 d$ (r radio de la sección de la cuerda, expresado en cm., d densidad de la substancia de la cuerda), se tiene

$$n_1 = \frac{1}{2lr} \sqrt{\frac{F}{\pi d}}. \quad [1']$$

Si la tensión es producida por un peso de masa M gr. es necesario reemplazar F por Mg (g intensidad de la gravedad en unidades CGS).

Los armónicos sucesivos tienen por frecuencias $2n_1, 3n_1, 4n_1, \dots$

Teoría. — Todo movimiento vibratorio comunicado a un punto cualquiera de una cuerda se propaga en los dos sentidos a partir del punto considerado y se refleja en los extremos de la cuerda. Estos movimientos vibratorios producen interferencias entre sí. Pero, si los dos extremos de la cuerda están sujetos, tales puntos son forzosamente nodos. Los únicos estados vibratorios que pueden persistir en una cuerda son, pues, aquellos en que los dos extremos de la cuerda son nodos.

Siendo el intervalo de dos nodos consecutivos la mitad de la longitud de onda, siguese de ahí que la longitud l de la cuerda contiene necesariamente un número entero de semilongitudes de onda.

Siendo λ la longitud de onda de un sonido cualquiera emitido por la cuerda, se tendrá pues

$$l = K \frac{\lambda}{2}.$$

Pero siendo n la frecuencia del sonido considerado

$$\lambda = \frac{v}{n}, \quad \text{de donde} \quad l = K \frac{v}{2n}.$$

De donde :

$$n = \frac{KV}{2l}.$$

Para el sonido fundamental la cuerda no presenta más que una concameración, y se tiene $K = 1$, de ahí

$$n_1 = \frac{V}{2l}.$$

Para los valores $K = 2, K = 3, \dots$, la cuerda presenta 2, 3... concameraciones, y las frecuencias correspondientes son $2n_1, 3n_1, 4n_1$, que son los armónicos del sonido fundamental.

Fórmula de Taylor. — Este demostró teóricamente que la velocidad V de propagación de una sacudida transversal a lo largo de una cuerda está dada por la fórmula

$$V = \sqrt{\frac{F}{\mu}}. \quad [2]$$

Luego, en general, se tiene

$$N = \frac{K}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}},$$

o para el sonido fundamental,

$$N_1 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

que es la fórmula [1].

TUBOS SONOROS

444. Definiciones. — Llámense *tubos sonoros* unos tubos de paredes

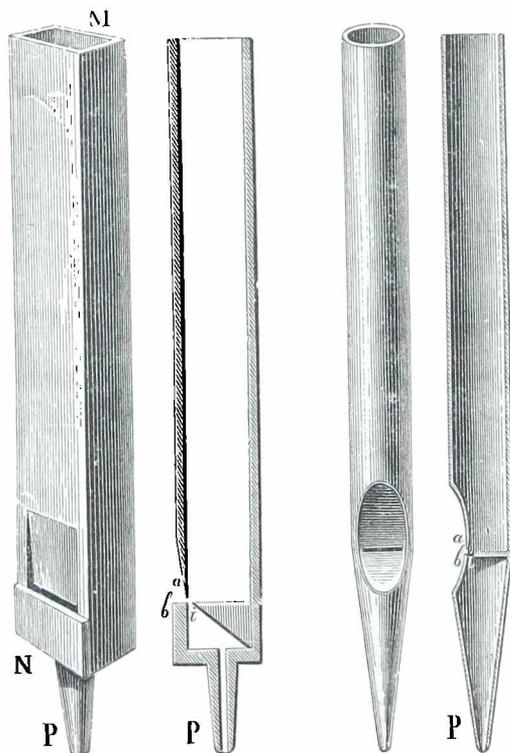


Fig. 442.

Fig. 443.

resistentes, en los cuales se producen sonidos haciendo vibrar la columna de aire que contienen, lo cual se consigue por medio de una *embocadura*.

En los llamados *tubos de boca*, el aire insuflado por fuelles pasa por una hendidura estrecha i (fig. 442) que se denomina *luz*. En la pared opuesta a tal hendidura existe una abertura transversal que es la *boca*; su borde a , cortado en bisel, es el *labio superior* y el borde b , el *labio inferior*.

En la *flauta travesera*, la embocadura consiste en un simple orificio circular lateral. La figura 443 representa la embocadura de un tubo cilíndrico muy usado en los juegos de órgano.

Tubos de lengüeta. — La columna de aire es puesta en vibración en estos tubos por medio de una pieza elástica especial llamada *lengüeta*. Hay dos especies, la *fija* y la *libre*.

1º *Lengüeta fija.* -- Compónese de una pieza de madera o de metal C (fig. 444) trabajada en forma de cuchara en el sentido de su longitud, y fija en una especie de tapón A taladrado por un agujero que hace comunicar la cavidad de C con un largo tubo RR'. Dicha pieza C lleva una lámina L, de latón, delgada y flexible, que tapa su entrada y que es lo que en propiedad debería llamarse *lengüeta*. En su posición ordinaria, ésta se encuentra algo apartada de los bordes de C; pero puede acercarse fácilmente y cerrar el conducto. Por fin, un alambre *r* se aplica por su parte inferior, que está encorvada, sobre la lengüeta, a fin de regular su alejamiento y acortar o alargar más o menos la parte vibrante, lo cual permite aumentar o disminuir el número de sus vibraciones.

Este aparato puede adaptarse en lo alto de un tubo rectangular o *portaviento*, fijo en la caja de los fuelles.

2º *Lengüeta libre.* -- Grenié inventó en 1810 una especie de lengüeta L' que se llama *libre* porque penetra en el conducto de C rozando sus bordes y oscilando sin dificultad de dentro a fuera.

Tubos abiertos y tubos cerrados. -- Entre los tubos sonoros empleados, unos están abiertos por su extremo superior y otros, cerrados por un tabique.

445. Leyes experimentales de los tubos sonoros.

— Las leyes que determinan los sonidos emitidos por los tubos sonoros han sido sucesivamente descubiertas por el P. Mersenne y Daniel Bernouilli, y se aplican *exclusivamente a los tubos estrechos*.

LEY DEL P. MERSENNE (*Ley de los tubos semejantes*). — *Dos tubos semejantes producen sonidos cuyos números de vibraciones están en razón inversa de sus longitudes.*

Por ejemplo, si se hace sonar sucesivamente a dos tubos abiertos cuyas longitudes estén en la relación de 1 a 2 y de modo que emitan el sonido más grave posible, o *sonido fundamental*, el tubo menor producirá un sonido en la octava aguda del emitido por el mayor. Lo mismo sucede en dos tubos cerrados.

Armónicos. -- Además del sonido llamado fundamental de que acabamos de hablar, un tubo sonoro puede emitir armónicos de ese sonido que casi siempre están mezclados con el sonido fundamental, como en el caso de las cuerdas. Estos armónicos obedecen a las leyes siguientes.

LEYES DE BERNOUILLI. — 1º (*Caso de los tubos abiertos*). — *Un mismo tubo abierto puede emitir una serie de sonidos armónicos cuyas frecuencias son entre sí como la serie de los números naturales.*

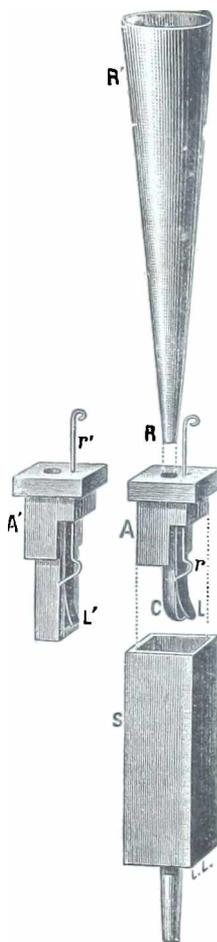


Fig. 444.

Esto quiere decir que si se representa por 1 el sonido fundamental, los que vienen después son sucesivamente 2, 3, 4, 5, 6, 7... : esta es la serie completa de los armónicos del sonido fundamental.

2º (Caso de los tubos cerrados). — *Un mismo tubo cerrado puede emitir una serie de sonidos armónicos cuyas frecuencias varíen como la serie de los números impares.*

Esto quiere decir que si se representa por 1 el número de las vibraciones del sonido fundamental, los de los otros sonidos emitidos estarán expresados por 3, 5, 7...

Para establecer estas leyes, se coge un tubo largo, abierto o cerrado, y se introduce en él una corriente de aire, a presión muy débil al principio, pero que, luego, vaya aumentando gradualmente. Se oye, primero, el sonido fundamental, y después, sucesivamente, los diversos armónicos. Obsérvase que estos armónicos son los que las leyes anteriores indican.

3º *El sonido fundamental emitido por un tubo cerrado está en la octava grave del sonido fundamental emitido por un tubo abierto de igual longitud.*

Esta ley puede también enunciarse así :

El sonido fundamental emitido por un tubo cerrado es el mismo que el sonido fundamental de un tubo abierto de doble longitud.

Esta última ley se demuestra por medio de un tubo abierto en sus dos extremos, provisto en su centro de un diafragma de corredera y taladrado por una abertura cuadrada igual a la sección del tubo (fig. 445). Cuando está dentro el diafragma, el tubo queda abierto en toda su longitud: y se halla cerrado en su centro cuando el diafragma tiene la posición que indica el dibujo. Se nota que en ambos casos, el sonido es idéntico.

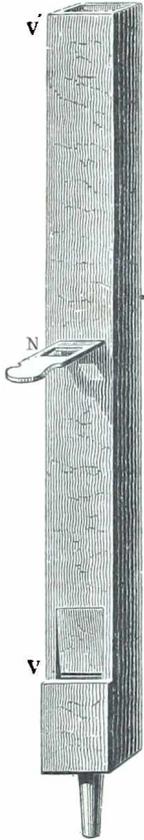


Fig. 445.

446. *Fórmulas de los tubos sonoros.* — La teoría siguiente conduce a fórmulas que contienen las leyes experimentales. Sea n , la frecuencia del sonido fundamental de un tubo *abierto* de longitud l ; se tiene.

$$n_1 = \frac{V}{2l},$$

siendo V la velocidad de propagación del sonido en el gas del tubo. Los armónicos tienen por frecuencias $2n_1$, $3n_1$, $4n_1$, etc.

Para un tubo *cerrado*, la frecuencia n'_1 del sonido fundamental es $\frac{n_1}{2}$, de donde

$$n'_1 = \frac{V}{4l}.$$

Los armónicos que puede emitir el tubo cerrado tienen por frecuencias $3n'_1$, $5n'_1$, $7n'_1$, etc.

Teoría. — Cuando se pone en vibración la columna de aire contenida en un tubo sonoro, este movimiento vibratorio se transmite al gas del tubo y se refleja en los dos extremos, siendo indiferente el que dichos tubos sean abiertos o cerrados. Por razones análogas a las que hemos expuesto al tratar de las cuerdas vibrantes, un movimiento vibratorio no puede establecerse de modo permanente en un tubo más que cuando todo extremo abierto es un vientre de vibración y todo extremo cerrado un nodo.

Si nos limitamos al caso de los tubos de boca, notaremos que, por causa de la disposición de la embocadura, estos tubos están abiertos por el extremo que ésta posee.

1. *Caso de los tubos abiertos.* — Están abiertos por sus dos extremos. Luego estos dos extremos tienen que ser vientres.

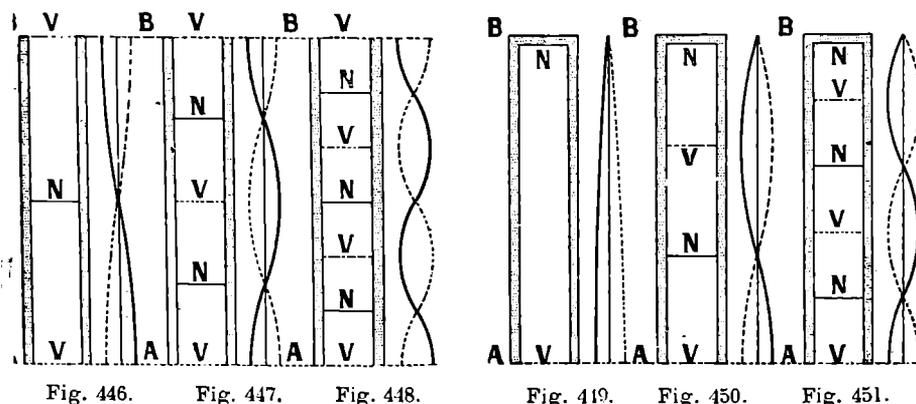
1º. La disposición más sencilla de los nodos y vientres en el interior del tubo comprende evidentemente un solo nodo en el centro del tubo (fig. 446). Las ordenadas de la curva figurada con trazo lleno representan las elongaciones máximas de las diversas secciones; la curva trazada con puntos indica las mismas elongaciones, un semiperíodo después. Pero, en el tubo sonoro, estas elongaciones son longitudinales.

El sonido que emite el tubo en este caso es el sonido fundamental. Según lo que antecede, es tal, que la longitud del tubo es igual a una semilongitud de onda del sonido.

Sea V la velocidad del sonido en el gas que llena el tubo; l la longitud de este tubo; T , el período del sonido fundamental; n , su frecuencia y λ , la longitud de onda de este sonido, en el gas del tubo; tenemos :

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{VT}{2}; \quad \text{de donde} \quad T = \frac{2l}{V} \quad \text{y} \quad n = \frac{V}{2l}.$$

2º. El período de vibración del sonido puede ser tal que, entre los dos vientres que se



hallan en los dos extremos, haya dos, tres nodos intermedios (fig. 447, 448). El estado vibratorio está representado esquemáticamente por las curvas situadas a la derecha del tubo.

En general, la longitud l del tubo comprenderá, para cualquier sonido emitido, un número entero K de semilongitudes de onda. Se tendrá pues

$$l = \frac{K\lambda}{2}.$$

Si n es la frecuencia del sonido, $\lambda = \frac{V}{n}$. Por consiguiente

$$l = \frac{KV}{2n}, \quad \text{de donde} \quad n = \frac{KV}{2l}.$$

Para $K = 1$ se tiene el sonido fundamental ($n = \frac{V}{2l}$). Para $K = 2, K = 3, K = 4, \dots$, se tienen los armónicos sucesivos ($2n, 3n, 4n, \dots$)

OBSERVACIÓN. — Los experimentos no demuestran con gran exactitud la ley de las longitudes, debido a que los dos vientres extremos no se hallan rigurosamente en los dos extremos del tubo, sino un poco más lejos, en donde la presión del aire es rigurosamente constante. Y, en la fórmula, l representa la distancia de los vientres extremos, distancia que es algo mayor que la longitud del tubo.

II. *Caso de los tubos cerrados.* — Un tubo de boca está cerrado por uno de sus extremos y abierto por el otro. Posce, pues, un vientre en el extremo abierto y un nodo en el extremo cerrado.

1°. El estado vibratorio más sencillo es aquel en el cual no hay ningún nodo entre los extremos (fig. 449). En este caso, la longitud l del tubo es igual a un cuarto de longitud de onda del sonido (distancia entre un nodo y un vientre consecutivos).

2°. Si, entre los extremos, hay uno, dos... nodos intermedios (fig. 450, 451), la longitud del tubo comprende tres, cinco... cuartas partes de longitud de onda.

En general, la longitud l del tubo comprenderá un número impar $(2K - 1)$ de cuartas partes de longitudes de onda.

Para cualquier sonido emitido, de longitud de onda λ' y de frecuencia n' se tendrá pues

$$l = (2K - 1) \frac{\lambda'}{4}.$$

De donde, reemplazando λ' por $\frac{V}{n'}$,

$$l = (2K - 1) \frac{V}{4n'}, \quad \text{y} \quad n' = (2K - 1) \frac{V}{4l}.$$

Para el sonido fundamental (n'), $K = 1$ y se tiene $n' = \frac{V}{4l}$ (o $\frac{n_1}{2}$, siendo n_1 el sonido fundamental del tubo abierto do igual longitud). Para $K = 2$, $K = 3$, $K = 4$, etc., se encuentran frecuencias $3n'$, $5n'$, $7n'$,... que son armónicos impares.

Por esta teoría se encuentran, pues, los resultados ya enunciados anteriormente (445). La teoría y el experimento dan igualmente los mismos resultados para la posición de los nodos y de los vientres.

447. — **Investigación de los nodos y vientres.** — La conformidad de los experimentos con la teoría puede llevarse más lejos, determinando las posiciones de los nodos y vientres. Para esto, se aprovechan las propiedades conocidas (433): en los vientres, el aire vibra con un máximo de amplitud; pero no hay variaciones de presión; mientras que en los nodos, no vibra el aire; pero existen variaciones máximas de presión.

1°. Pégase una membrana de badana sobre un anillo de cartón sostenido por tres alambres, a manera de platillo de balanza, después se echa arena sobre la badana y se baja todo enteramente por la parte interior de un tubo, a medida que éste habla (fig. 452). Pues bien, de distancia en distancia se observa que los granos de arena permanecen inertes sobre la badana; ahí están los nodos; mientras que en las posiciones intermedias dichos granitos son lanzados con más o menos viveza por las vibraciones que la membrana recibe del aire.

2°. Practicase en las paredes de un tubo sonoro agujeros que es posible abrir o cerrar a voluntad por medio de obturadores movibles alrededor de tornillos (fig. 453). Como la presión del aire es la misma do fuera on las partes correspondientes a los vientres, si se hace un agujero frente a éstos, el sonido no experimenta modificación ninguna. Por el contrario, frente a los nodos, donde la presión del aire es variable, el sonido cambia enteramente; en consecuencia se forma un vientre donde había un nodo.

3°. Se hace penetrar en el interior de un tubo, un tubito delgado de goma, aplicando el otro extremo al oído. Cuando el orificio del tubo se halla en el vientre, como no se producen en él variaciones de presión, no se transmiten al oído compresiones ni dilataciones, y éste no oye sonido alguno, o mejor dicho, sólo oye un sonido muy débil.

Inversamente, si el tubo de goma está en un nodo, como las variaciones de presión son máximas, el oído percibe un sonido mucho más intenso que en cualquier otra posición del tubo.

Este experimento permite, pues, reparar la posición de los vientres.

4°. *Cápsula manométrica de Kœning.* — *Llamas manométricas.* — En el experimento anterior se puede reemplazar el oído por la *cápsula manométrica*, ideada por Kœning y que permite realizar el fenómeno en presencia de todo un auditorio

Es una pequeña caja C (fig. 454) dividida en dos compartimientos por una membrana de caucho M: el de la izquierda contiene aire y comunica con el tubo sonoro mediante un tubo T; el de la derecha contiene gas del alumbrado que se introduce por un tubo G y va a arder en B. Cuando el tubo T transmite compresiones y dilataciones, la membrana M vibra, la presión del gas del alumbrado sufre variaciones periódicas y la altura de la llama F varía también. Si se mira esta llama en un espejo giratorio, o en un sistema de varios espejos giratorios, como el representado en la figura 450, se ve una flama luminosa dentada (fig. 455, II) en vez de una flama luminosa continua (fig. 455, I) que produce la llama cuando no vibra.

Conclusión. — Sea cual fuere el procedimiento empleado para marcar los nodos y vientres, ya se use un tubo abierto, o ya cerrado, y que se haga producir al tubo el sonido fundamental o un armónico cualquiera, los nodos y vientres siempre se hallan dispuestos conforme indica la teoría.

Esta concordancia entre la experimentación y la teoría demuestra perfectamente el fenómeno de la reflexión del movimiento vibratorio, con cambio de sentido de la elongación, cuando se produce la reflexión en una pared rígida, y sin cambio de sentido cuando se origina en un extremo abierto (426).

448. Influencia de la naturaleza del gas vibrante. — Si, en un tubo sonoro, se introduce un gas distinto del aire, gas del alumbrado, por ejemplo, se ve que la altura del sonido fundamental no es la misma que si se introdujera aire.

Este fenómeno se explica fácilmente. La longitud l del tubo es una semilongitud de onda del sonido, cualquiera que sea el gas que alimente al tubo. Llamemos V y V' a las velocidades del sonido en dos gases. Cuando se introduzcan sucesivamente en el mismo tubo abierto, haciendo que éste produzca el sonido funda-

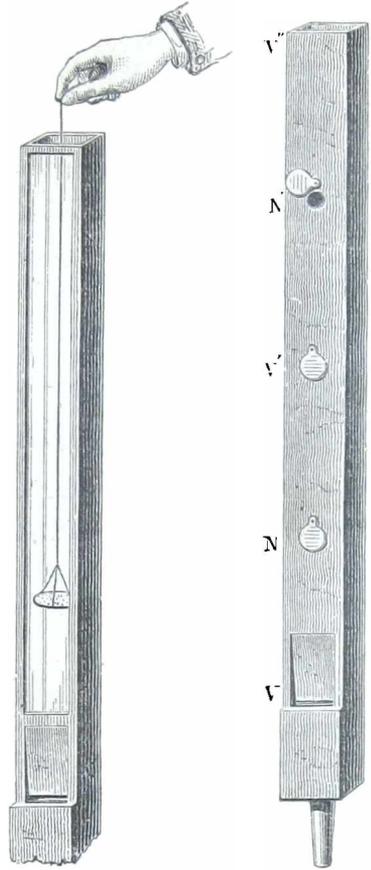


Fig. 452.

Fig. 453.

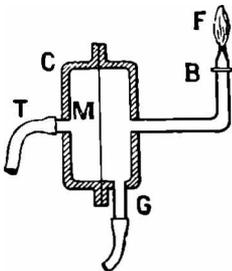


Fig. 454.

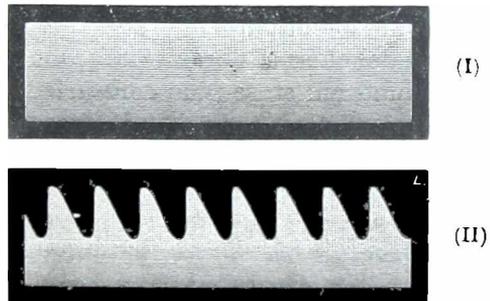


Fig. 455.

mental, los períodos T y T' , del sonido omitido deberán ser tales que se tenga :

$$l = VT = V'T'$$

De donde

$$\frac{T}{T'} = \frac{V'}{V}$$

y, en las frecuencias, del sonido, tendremos :

$$\frac{n}{n'} = \frac{T'}{T} = \frac{V}{V'}$$

La frecuencia del sonido emitido es, pues, proporcional a la velocidad del sonido en el gas que vibra e inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad de este gas. En consecuencia, el sonido emitido en un tubo por el gas del alumbrado es más alto que el que produce el aire en el mismo tubo porque la densidad del gas es menor que la del aire.

Demuétrase la misma ley para un tubo cerrado.

CAPÍTULO VIII

FENÓMENOS DE RESONANCIA. — ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE LOS SONIDOS.

TIMBRE. — PERCEPCIÓN DE LOS SONIDOS.

449. **Fenómenos de resonancia. — Refuerzo.** — Supongamos un cuerpo capaz de adquirir un movimiento oscilatorio de período determinado, un péndulo, por ejemplo, y comuniquémosle un pequeño impulso; producirá una oscilación de pequeña amplitud. Pero, si después de un período completo le damos un nuevo impulso en el mismo sentido, como el efecto de éste se añade al efecto del primero, la oscilación aumentará de amplitud. Se comprende, pues, que si a un sistema capaz de oscilar, se le comunican impulsos cuyo período sea igual al período propio de oscilación del sistema, este último, al cabo de cierto tiempo, tendrá un movimiento oscilatorio de gran amplitud. En cambio, si los impulsos no tienen el mismo período que las oscilaciones propias del cuerpo, obrarán tan pronto en el sentido del movimiento de éste, como en el sentido contrario, de manera que el efecto de unos destruirá el de los otros, y el cuerpo no efectuará sino oscilaciones de pequeña amplitud.

Por ejemplo, rimando el campanero sobre el período de oscilaciones de una campana los esfuerzos que él ejerce en la cuerda, consigue dar a la campana oscilaciones de amplitud suficiente. Asimismo, si se marcha sobre un puente colgante, ejerciendo sobre él esfuerzos rimados sobre su propio período de oscilaciones, se puede comunicar a éstas una amplitud peligrosa para la solidez del puente.

Estos fenómenos, llamados *fenómenos de resonancia* se presentan de modo muy notable en acústica. Emitamos, al lado de un cuerpo sonoro silencioso, un sonido de la misma altura que el suyo propio. El aire transmitirá al cuerpo sonoro, impulsos del mismo período que

el suyo, y por lo tanto, empezará a vibrar. Pero no sucederá así, si el sonido producido a su lado no es de la misma altura.

Estas condiciones se cumplen fácilmente por medio de dos diapasones al *unísono*, o con dos cuerdas al *unísono*. Además, si se emite un sonido delante de un piano, la cuerda capaz de producir el mismo sonido resuena.

El mismo fenómeno ofrecen los tubos sonoros. Si, a la abertura de un tubo, se aplica un diapasón acordado con el tubo, el tubo *habla* y el sonido que emite *refuerza* el emitido por el diapasón, el cual, a no ser por esto, permanecería casi imperceptible. Por esto se acompaña casi siempre a los diapasones, de una caja de *resonancia* (fig. 374), que no es sino un tubo sonoro acordado con el sonido del diapasón.

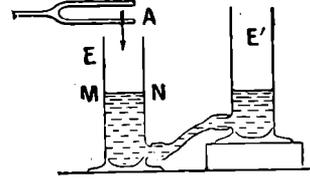


Fig. 456.

Estos fenómenos de resonancia pueden demostrarse también por cavidades llenas de aire, mediante el experimento siguiente.

Se cogen dos probetas E, E' que contengan agua y se comuniquen en su parte inferior por un tubo de caucho (fig. 456). Se acerca un diapasón a la boca de E y se eleva más o menos E'. Se obtiene un refuerzo notable cuando el nivel en E está en cierto plano MN; pero es menor cuando el nivel está un poco más arriba o abajo de MN. El refuerzo se produce cuando el sonido que puede emitir el tubo cerrado EM es de la misma altura que el del diapasón.

450. Análisis de los sonidos. — 1º Método de Helmholtz. Resonadores.



Fig. 457.

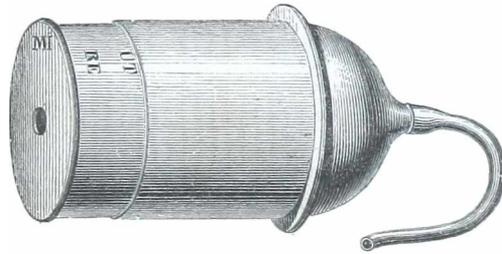


Fig. 458.

— Helmholtz aplicó los fenómenos de resonancia al estudio de diversas procedencias sonoras.

Las cajas de resonancia utilizadas por Helmholtz son globos huecos de latón (fig. 457) cuyas dimensiones varían de manera que puedan reforzar todas las notas de la gama: esto es lo que se llama *resonadores*.

Cada resonador está taladrado en los dos extremos de un mismo diámetro por dos orificios circulares: en uno de ellos, se fija un conducto cilíndrico *a* y en el otro, un tubo cónico *b*. La elevación del sonido con que está acorde un resonador depende de sus dimensiones y del tamaño de la abertura *a*. El operador recibe el sonido exterior por

el orificio *a* e introduce el cono *b* en uno de sus oídos, procurando taparse el otro. Experimentado de esta manera, el oído es sordo para todo sonido que no sea el del resonador, mientras percibe éste muy bien apenas se produce, aunque sea débil y esté mezclado con otros armónicos. De ahí un método muy sensible para distinguir un sonido entre gran número de otros.

Hay que advertir, sin embargo, que un resonador refuerza, no sólo

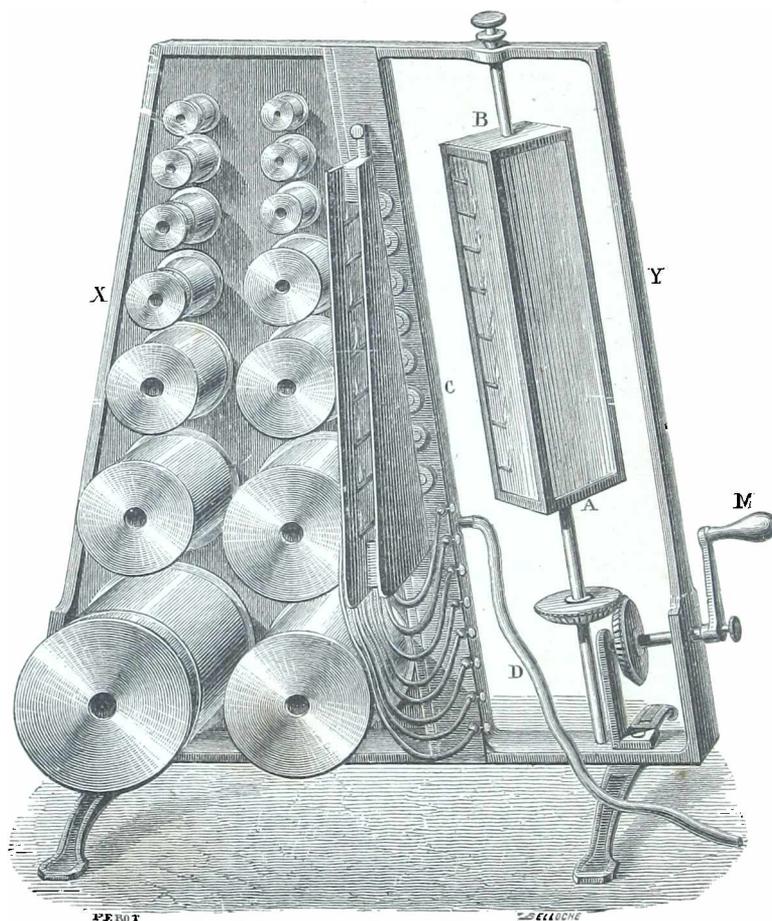


Fig. 459.

un sonido, sino todos los armónicos de este mismo sonido. Por consiguiente aquí hay una causa de error que hay que tener en cuenta en el análisis de los sonidos.

2º *Resonadores y aparato analizador de Kæning.* — El resonador construido por Kæning es cilíndrico y permite variar a voluntad el volumen del gas vibrante (fig. 458). Uu mismo resonador puede servir para reforzar sucesivamente varias notas. En el extremo cónico puede aplicarse un tubo de goma que sirve para unir el resonador a *cápsulas manométricas* (447).

Kœning ha construido también un aparato en el cual una serie de resonadores obran sobre llamas manométricas (fig. 459).

451. **Resultados generales de Helmholtz.** — 1º *Sonidos simples y compuestos.* — Helmholtz ha demostrado la existencia de los *sonidos simples* y analizado la composición de los *sonidos compuestos*.

Se conoce un sonido simple en que no hace hablar más que a un resonador, y un sonido compuesto, en que hace hablar a varios resonadores.

Un diapasón da un sonido simple. Una flauta, la voz humana pronunciando la letra *u*, emiten sonidos casi simples, porque los armónicos que acompañan el sonido fundamental tienen débil intensidad. El carácter físico de los sonidos simples es que si difieren entre sí por la altura y por la intensidad, apenas se distinguen por su *timbre*; sólo los sonidos compuestos tienen timbres bien distintos.

2º *Timbre de los sonidos compuestos.* — Helmholtz ha establecido entre los sonidos compuestos dos categorías. Unos no están formados por la superposición de armónicos verdaderos; su sonido fundamental está acompañado por otros parciales, no armónicos, que son más o menos persistentes, más o menos regulares: a esta categoría pertenecen los que se obtienen con placas metálicas y campanas de vidrio o metal. Los sonidos compuestos de esta clase *están desprovistos de carácter musical*. Al contrario, los constituidos por un sonido fundamental, acompañado de armónicos propiamente dichos, poseen en alto grado el *carácter musical* formado por la cualidad acústica que se denomina *timbre*: tales son los producidos por los diversos instrumentos de música.

Helmholtz ha demostrado en lo tocante a sonidos musicales propiamente dichos que las diferencias de timbre se deben no sólo a la mayor o menor multiplicidad de los armónicos superiores, sino también a su grado de intensidad más o menos alto.

3º *Síntesis de los sonidos.* — Helmholtz no se limitó a descomponer los sonidos, sino que comprobó los resultados de su análisis por la síntesis. Valiéndose de otro aparato bastante complicado, pero muy ingenioso, reprodujo un sonido dado, por la superposición de los simples que había descubierto con el aparato analizador.

452. **Sonidos de la voz humana. — Vocales*.** — La cuestión más interesante discutida es la de la emisión de las vocales. La teoría de Helmholtz, que hasta hoy era la más extendida, está llamada a desaparecer. Nos limitaremos sencillamente a señalar los resultados de los trabajos hechos por el Dr Marage sobre este particular.

Este autor distingue varios casos:

1º La vocal simplemente *murmurada*. En este caso la cavidad bucal toma una forma determinada para cada vocal, y la espiración del aire determina un sonido cuya elevación es algo variable para una misma vocal.

2º La vocal *hablada o cantada*.

En este caso funciona la laringe y produce vibraciones *intermitentes* de aire. La A está

* Este párrafo y los relativos a la percepción de los sonidos han sido redactados con la colaboración del Dr Marage.

formada de un grupo de 3 vibraciones seguido de un reposo; reproduciéndose este fenómeno n veces por segundo da un sonido de elevación n . E y O están formadas por la sucesión de grupos de 2 vibraciones separadas por un reposo, puesto que la una se distingue de la otra por la forma de la abertura de la glotis. Para I y OU las vibraciones son continuas; pero para OU la glotis está más abierta que para I.

Para que no sea transformada por la cavidad bucal la vocal que emite así la laringe, es preciso que la cavidad forme un resonador acorde con la suma de las vibraciones producidas: por ejemplo, una A compuesta de n períodos comprende por segundo $3n$ vibraciones; por consiguiente el resonador bucal debe de estar acorde con el 3^{er} armónico; para E y O debe de estar acorde con el 2^o armónico y para I y OU debe de estar al unísono de la vocal.

Si estas formas necesarias de la cavidad bucal son las mismas que las que correspondían a las vocales murmuradas, las vocales estarán bien emitidas. Correspondiendo estas formas, como ya hemos visto, a elevaciones algo determinadas, resulta que sólo se emitirá bien una vocal cuando la nota sea algo fija. La nota más favorable para la A tendrá un número de vibraciones tres veces menor que la nota de esta vocal murmurada. Así se comprende por qué, en las notas elevadas, por ejemplo, los cantantes dejan de articular perfectamente las vocales. Por consiguiente, la boca puede modificar más o menos profundamente la vocal; y así es cómo se producen las demás vocales del alfabeto francés.

Se han efectuado dos clases de experimentos: 1^o experimentos de análisis, en que se inscriben los sonidos; 2^o experimentos de síntesis, en que se reproducen las condiciones reveladas por el análisis.

Inscripción de las vocales. —

El Dr Marage ha operado por varios métodos. Uno de los que le han dado mejor resultado es la *fotografía de las llamas manométricas* (417). Sustituye el gas del alumbrado por acetileno y, con el objetivo de una máquina fotográfica, produce la imagen de la llama en una placa sensible contenida en un bastidor que se mueve ante el objetivo.

El procedimiento de inscripción más reciente y más perfecto empleado por Marage es el siguiente. El sonido lo emite una trompetilla acústica C (fig. 460) terminada por una membrana v . Ésta está ligada a un espejito plano M, móvil alrededor de un eje horizontal O. El punto luminoso S envía a M rayos que, concentrados por una lente L, forman una imagen real en S', en una hoja de papel sensible. El punto S se mueve horizontalmente, de modo que, si el espejo M no vibra, S' traza en el papel una recta horizontal. Pero, al emitir el sonido, S' vibra verticalmente, al mismo tiempo que se mueve horizontalmente. Por lo tanto, traza en el papel una línea sinuosa que es la inscripción del sonido. Para poder efectuar inscripciones de larga duración, el punto S, vuelto a su posición primitiva, muévase otra vez horizontalmente y así sucesivamente. Para evitar la superposición de las inscripciones se imprime al papel un movimiento vertical. De este modo las inscripciones se disponen en la banda de papel, como líneas de escritura algo inclinadas. El papel, que procede de un rollo R, va a parar a cubos que contienen un baño para desarrollar D y fijar a F, de donde sale presentando una verdadera *fotografía de la palabra*.

Según todos los experimentos los trazados de la diversas vocales pueden ser representados por las curvas de la figura 461. En realidad, los trazados obtenidos son siempre algo más complicados, a causa de las vibraciones propias de los aparatos de transmisión.

Síntesis de las vocales. Principio de los experimentos. — Para reproducir las vocales según los resultados de sus análisis, Marage toma una sirena cuyo platillo fijo no contiene más que una hendidura dirigida según el radio del disco; el platillo móvil está horadado con hendiduras iguales a la fija y de su misma dirección. Para reproducir las vocales U, O, A, las hendiduras son triangulares y están agrupadas de este modo: una, para la U; dos, para la O; tres, para la A (fig. 462). Las vocales E, I, se obtienen tomando hendiduras estrechas y rectilíneas: agrupadas dos a dos, dan la vocal E, y una

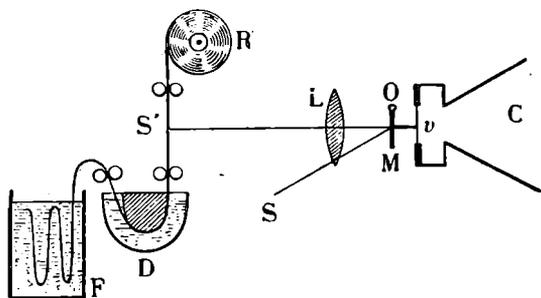


Fig. 460.

sola produce la vocal I. Los trazados de estas vocales artificiales obtonidas por los métodos anteriores son los mismos que los de las vocales naturales emitidas por la laringe.

Para obtener una reproducción perfecta de las vocales, Marage ha mandado construir moldes de la cavidad bucal de una persona que las iba pronunciando. Y los ha utilizado como resonadores, en sus sirenas.

Experimentos de Blondel. — Blondel, para registrar los sonidos de la voz, estudió, con

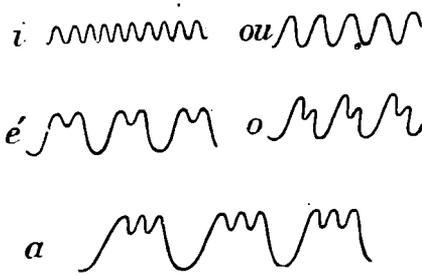


Fig. 461.

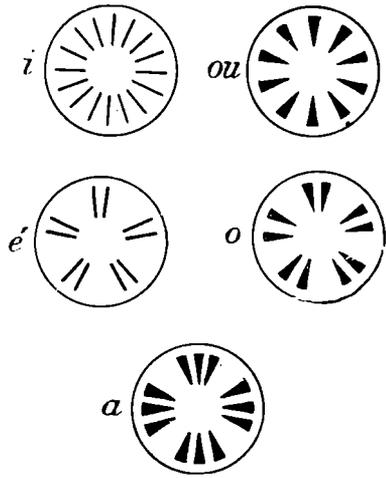


Fig. 462.

su oscilógrafo (857), las variaciones de corriente producidas por la palabra en el circuito de un teléfono, y obtuvo resultados conformes con los de Marage.

Emisión de las consonantes. — Según el Dr. Marage, las consonantes provendrían de ruidos que acompañan las vocales, y duran muy poco tiempo. Esto explica por qué ciertas personas duras de oído no perciben las consonantes, mientras que oyen las vocales.

PERCEPCIÓN DE LOS SONIDOS

453. *Descripción del oído.* — La percepción de los sonidos se efectúa por el sentido del oído.

Pueden distinguirse en este órgano tres partes: *oído externo, medio e interno.*

1º El *Oído externo* comprende:

La *oreja* o *pabellón* A (fig. 463), membrana compuesta de un esqueleto fibrocartilaginoso, cubierto de piel: es lo que vulgarmente se llama oreja, que presenta un fondo ensanchado, que se llama *concha*.

El *conducto auditivo* externo B, que arranca de la *concha*, es fibrocartilaginoso por fuera, huesoso por dentro y cubierto de piel, y va a terminar en la pared externa de la *caja* C.

2º El *oído medio* está formado por la *caja* y sus accesorios.

La *caja*, *tambor* o *timpano*, es una cavidad llena de aire que comunica por un conducto llamado *trompa de Eustaquio* con la porción nasal de la faringe. La *caja* y la *trompa* están tapizadas con una membrana mucosa. La *caja* tiene dos paredes: una interna y otra externa. La externa está formada por la *membrana del timpano* C que separa la *caja* del conducto auditivo externo. La membrana del timpano está formada por una lámina fibrosa que tapiza la piel por fuera y la mucosa por dentro.

La pared interna presenta dos orificios o ventanas, que están cerradas con membranas: la *ventana oval*, arriba y por delante, y la *ventana redonda*, abajo y por detrás. Si se toma la ventana redonda como unidad de superficie, la oval tiene como superficie 2 y el timpano 44.

Tres huesecillos, rodeados por la mucosa, enlazan la membrana del tímpano con la oval; estos son:

El *martillo* M (fig. 464, I, II y III) que encaja en parte en la membrana del tímpano T; 2º el *yunque* E y el *estribo* E' cuya base descansa en la ventana oval. En F se ve además el músculo del martillo y en F' el del estribo, representados por flechas según su

acción. La figura I representa la vista exterior de la cadena de los huesecillos; la figura II, la vista interior, y la figura III, la vista lateral.

3º El oído interno o *laberinto* es la parte esencial del órgano y está formado por un

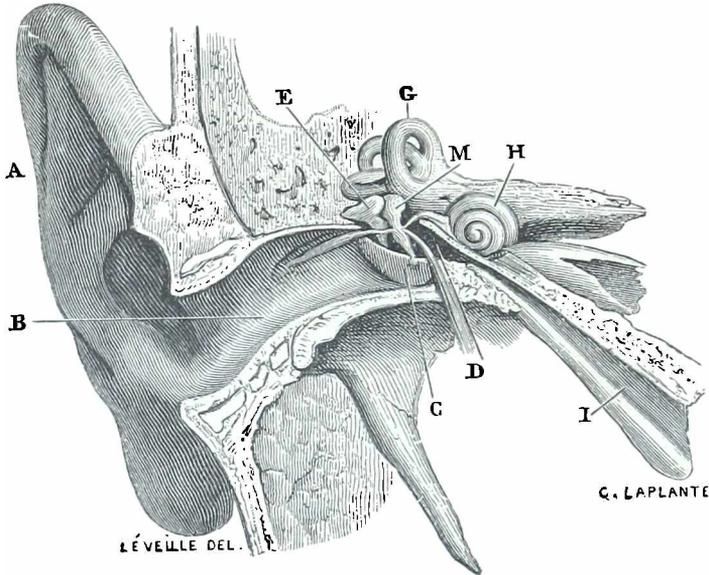


Fig. 463.

laberinto membranoso suspendido en el laberinto huesoso. Cada laberinto comprende : un *vestíbulo* en el centro; tres *canales semicirculares* G, por delante (fig. 463) y un *caracol* H, por detrás.

El laberinto huesoso está separado del membranoso por un líquido llamado *perilinf*a. El laberinto membranoso está lleno de un líquido llamado *endolinf*a. Estos dos líquidos no se comunican entre sí.

El caracol membranoso divide el espacio perilinfático que le rodea en dos *rampas*; la vestibular que comienza en el *vestíbulo*, es decir en el nivel de la *membrana oval*, y la *timpánica*, que comienza en el nivel de la *membrana redonda* (o *timpano secundario*). Estas dos rampas comunican entre sí en el nivel de la punta del *caracol*. La figura 465 representa esquemáticamente los diversos órganos del oído. El oído externo va del pabellón P al *timpano* T. El medio comprende los *huesillos* O, y está figurado de T á FF'. F es la *ventanilla ovalada*, y F', la *redonda*. peN es el oído interno; p, la *perilinf*a; e, la *endolinf*a; N, las *terminaciones nerviosas*.

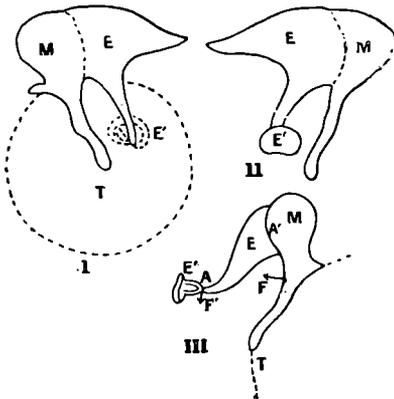


Fig. 464.

La *endolinf*a es un líquido especial cargado de ácido carbónico que contiene en disolución bicarbonatos de cal y magnesia con exceso de cristales de carbonatos insolubles : estos cristales, de los cuales el más voluminoso tiene 32 milésimas de milímetro de diámetro, se llaman *otolitos* y su conjunto forma la *otoconiq* o *polvillo* del oído. Por consiguiente, se ve que existe una disolución que permanece siempre saturada por el exceso de cristales (Marage).

El laberinto membranoso está tapizado de células epiteliales de pestañitas vibrátiles en ciertos puntos correspondientes con crestas que penetran en el interior del líquido, estas células son más voluminosas y están en comunicación con las puntas del nervio

acústico : éstas son las células auditivas; las que están en el caracol constituyen el órgano de Corti.

454. **Mecanismo de la audición.** — El pabellón recoge las ondas sonoras que llegan del exterior, las reúne, las refleja y las dirige al conducto auditivo. Luego el pabellón es ante todo un colector de sonidos, indicándonos a la vez la dirección de éstos. Nivelando con cera las anfractuosidades del pabellón, se disminuye la acuidad auditiva. La concha hace funciones de trompeta acústica. Su obstrucción debilita ligeramente el sentido del oído.

Las ondas sonoras llegan al contacto del tímpano, que, en estado normal, las transmite a la cadena de los huesecillos. El estribo empuja más o menos la perilinfa por medio de la ventana oval; la ventana redonda, combándose más o menos, sirve de válvula, puesto que el líquido es incompresible; estos movimientos son sumamente

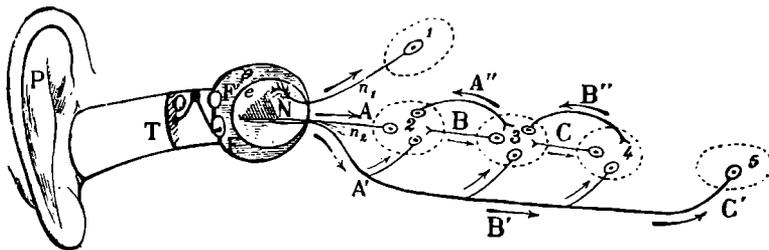


Fig. 465.

pequeños, a lo más del orden del milésimo de milímetro (Marage). En el oído interno no hay vibraciones, sino simplemente diferencias de presiones cuyo valor es de millonésimas de milímetro, es decir representado por unidades de la misma magnitud que las que actúan sobre el nervio óptico, o sobre los nervios de sensibilidad general (Marage).

Cuando se perfora el tímpano, no desaparece completamente la audición, porque las vibraciones son transmitidas directamente a la ventana redonda; pero sí disminuye la acuidad auditiva, porque la ventana redonda es la mitad más pequeña que la oval.

La acción de escuchar se verifica de la manera siguiente. En estado de reposo la cadena de los huesecillos está suspendida de tal manera, que el estribo tiende casi a separarse del oído interno; de modo que se perciben las vibraciones, pero con vaguedad: por el contrario, cuando se escucha, el músculo del martillo F se contrae arrastrando todos los huesecillos y el estribo se pone en contacto más íntimo con el oído interno.

El músculo del estribo F' impide por el contrario que este huesecillo empuje demasiado la ventana oval, es decir que la protege contra las grandes desviaciones.

La perilinfa y la endolinfa transmiten las diferencias de presiones a las células auditivas del oído interno. En el oído todo está dispuesto para disminuir la intensidad de las vibraciones exteriores que llegan al tímpano.

Hasta ahora se había admitido que los tres canales semicirculares servían para hacer conocer la posición del cuerpo respecto de los objetos exteriores (sentido del espacio); pero observaciones recientes han puesto en estudio esta cuestión.

La trompa de Eustaquio es el aparato de ventilación de la caja, la cual sirve para establecer el equilibrio de presión entre el aire de la caja y el exterior. El aire de la caja se renueva por la deglución, y como a cada instante deglutimos saliva, a cada movimiento de deglución se abre la trompa y por ella penetra en la caja el aire exterior.

455. **Teorías de la audición.** — 1º *Teoría de Helmholtz.* — Para explicar cómo percibe el oído los diversos sonidos con sus cualidades, Helmholtz supone que el oído *analiza* los sonidos complejos porque cada terminación nerviosa se acuerda con un sonido dado; las terminaciones cortas, con los sonidos agudos; las largas, con los graves.

Esta teoría está ya abandonada; pues, en efecto, parece imposible que estas terminaciones, cuyas dimensiones extremas varían de 1 a 12 se acuerden con el conjunto de las vibraciones percibidas, que va de 32 a 50 000. Además, sería preciso suponer que cada una de ellas permanece idéntica toda la vida, para acordarse siempre con el mismo sonido.

Teoría de P. Bonnier. — El autor de esta teoría hace notar que las pestañas vibrátiles de las células auditivas, que son relativamente muy largas, están adheridas al eje del caracol pasando sobre una cresta triangular cubierta por ellos. Las vibraciones transmitidas a la membrana que lleva las células, hacen sufrir a éstas, retenidas por sus pes-

tañas, tirones más o menos considerables, según la intensidad del sonido y más o menos frecuentes según la altura. El timbre está sujeto a la variación más o menos compleja de este tirón en función del tiempo. Luego cada célula registra las particularidades diversas de las vibraciones, que dan origen a nuestras sensaciones de intensidad, de altura y de timbre.

Teoría del Dr. Marage. — Este atribuye al cerebro el papel principal en la percepción de las cualidades de los sonidos. En realidad, puede decirse que el oído interno comprende no sólo los órganos que hemos descrito, sino también los centros más voluminosos y mucho más importantes que se encuentran en las diversas partes del cerebro. Estos centros se componen de células nerviosas, donde van a parar los hilos nerviosos que están sumergidos en la endolinfa.

El oído puede percibir tres clases de sonidos : los ruidos, la música, la palabra. Todas las terminaciones nerviosas endolinfáticas son influenciadas por igual y los centros nerviosos son los que reaccionan distintamente en las diferentes categorías de sonidos. Las terminaciones nerviosas comunican con varios centros representados esquemáticamente en 1, 2, 3, 4, 5, unos, por el *nervio vestibular* n_1 , otros, por el *coqueario* n_2 .

Según Marage, al producirse un ruido, reacciona el centro 1; en los animales inferiores se encuentra el análogo de este centro. Si se produce una vibración musical, puede reaccionar uno de los centros, 2, 3, 4. Esta vibración se transmite, ya de un centro a otro, por ABC, ya directamente, por A'B'. Si se destruye el conductor A, el centro 2 podrá, no obstante, reaccionar por A', el centro 3 y la vía centripeta A". Entonces se origina un retraso en la percepción. Si se produce una palabra, el centro 5, situado en la masa cerebral, es el que debe reaccionar para percibir la palabra.

Esta teoría permite explicar que si los centros auditivos se destruyen, se puede ser sordo, teniendo intactas las diversas partes del oído. Además los diversos centros pueden alterarse más o menos, y, como son independientes unos de otros, se comprende que algunas personas puedan oír ruidos muy ligeros, permaneciendo sordas a la música y a las palabras. De este modo se pueden imaginar todos los casos patológicos posibles, que, realmente, se han encontrado.

LIBRO VII

ÓPTICA

CAPÍTULO I

PROPAGACIÓN DE LA LUZ

456. **Definiciones.** — Llámase *luz* a la causa de los fenómenos que excitan en nosotros, por mediación del sentido de la vista, las sensaciones de la *visión*. Estos fenómenos se llaman a su vez *fenómenos luminosos*.

Se llama cuerpos *luminosos* a los que emiten luz por sí mismos, como el sol, las estrellas y los cuerpos en ignición. Los cuerpos llamados *iluminados* reciben luz procedente de un origen cualquiera para despedirla luego en todas direcciones. La luna, los planetas y casi todos los objetos terrestres se encuentran en este último caso.

Los cuerpos *transparentes* o *diáfanos* son los que dejan pasar fácilmente la luz : tales son el agua, los gases, el vidrio pulimentado. Los cuerpos *translúcidos* son también aquellos a través de cuya masa se distingue la luz, pero sin que sea posible reconocer la forma de los objetos : tales son, el vidrio sin pulimentar y el papel untado de aceite. Por fin, se denominan *cuerpos opacos* los que no se dejan atravesar por la luz, como la madera o los metales. Sin embargo, ninguno lo es en absoluto. La opacidad de los cuerpos depende de su grueso : todos son más o menos translúcidos cuando se les reduce a hojas bastante delgadas.

Dase el nombre de *Óptica* a la parte de la física que comprende el estudio de los fenómenos luminosos.

457. **Ley de la propagación rectilínea** — **Óptica geométrica.** — *En todo medio homogéneo, la luz se propaga en línea recta.*

Esta ley queda demostrada por los hechos siguientes :

1º Si se interpone un cuerpo opaco en la línea recta que une la vista con un punto luminoso, queda interceptada la luz.

(Llámase *punto luminoso* a un foco luminoso reducido a dimensiones geométricas tan pequeñas como se puede.)

Si se interpone entre la vista y el foco luminoso una serie de pantallas agujereadas, la luz pasa si todos los agujeros están en línea recta; en el caso contrario queda interceptada.

2º La luz que penetra en un cuarto oscuro por un pequeño agujero, marca en el aire un rasgo luminoso rectilíneo. Este rasgo es visible, porque ilumina los polvillos ligeros que se encuentran suspendidos en la atmósfera.

Rayos y haces luminosos. — Toda dirección rectilínea que sigue la luz al propagarse se llama *rayo luminoso*; un conjunto de rayos se denomina *haz luminoso*. A un haz estrecho se le da el nombre de *píncel*.

Cuando un haz luminoso proviene de un punto luminoso poco distante se dice que *diverge* y se le denomina *haz divergente*. Cuando, por lo contrario, se dirige hacia un punto poco distante se dice que *converge*, y se le llama *haz convergente*.

Óptica geométrica. — Todas las propiedades de la luz que se pueden deducir de su propagación rectilínea, se estudian en *óptica geométrica*.

458. **Teoría geométrica de las sombras.** — I. *Caso de un punto lumi-*

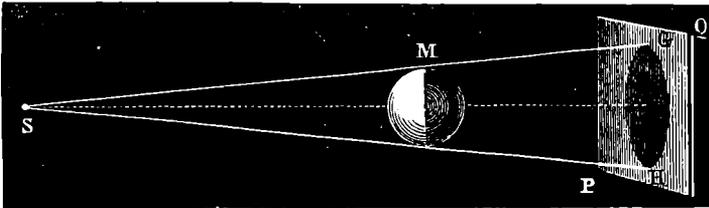


Fig. 466.

noso. — Sean S (fig. 466) el punto luminoso y M el cuerpo opaco que suponemos esférico.

Si se supone que alrededor de la esfera M se mueva una recta indefinida SG, permaneciendo siempre tangente a ella y pasando constantemente por el punto S, esta recta engendra una superficie cónica tangente al cuerpo opaco.

Efectivamente, todo punto interior a este cono y situado detrás de M no puede ser iluminado, puesto que la línea recta que une este punto con S encuentra al cuerpo opaco.

Se dice que este punto está en la *sombra producida* por el cuerpo opaco. Por el contrario, un punto exterior a este cono será iluminado.

Si se coloca al otro lado del cuerpo opaco una pantalla PQ, el paso de la sombra a la luz sobre la pantalla se efectúa bruscamente.

La línea de contacto del cono tangente con el cuerpo opaco divide además la superficie de éste en dos partes, una oscura e iluminada la otra.

II. *Caso de un objeto luminoso. Penumbra.* — Supongamos que el cuerpo opaco y el foco luminoso sean dos esferas SL y MN (fig. 467).

Si se imagina que una recta indefinida AG se mueva tangencialmente a estas esferas, cortando constantemente la línea de los centros en el punto

A, esa línea engendra una superficie cónica que tiene como vértice este punto, y que limita, detrás de la esfera MN, un espacio MGHN completamente privado de luz.

Análogamente, si otra recta LD, que corta la línea de los centros en B gira tangencialmente a las dos esferas de modo que engendre una nueva superficie cónica DBC que tiene su vértice en B, toda la parte exterior a esta superficie queda completamente en la luz.

Efectivamente, si se coloca una pantalla PQ detrás del cuerpo opaco, se distinguen claramente tres regiones: 1º una zona central HG completamente oscura, limitada por la superficie cónica de las tangentes comunes exteriores AMG y ANH; 2º una zona periférica, completamente iluminada, que está limitada en su parte exterior por la superficie

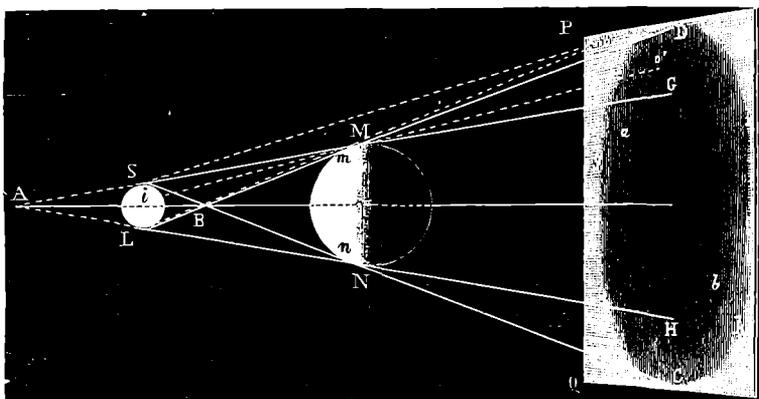


Fig. 467.

cónica de las tangentes comunes interiores LBMD y SBNC; 3º en fin una zona intermedia, que está limitada exteriormente por el cono de las tangentes interiores MD y NC, e interiormente por el cono de las tangentes interiores MG, NH. Esta zona no es ni completamente clara ni del todo oscura, pero la sombra va *degradándose* en ella, quiere decir, atenuándose, desde la zona central a la periferia: he ahí lo que se llama *penumbra*; su iluminación aumenta de G a D.

OBSERVACIONES. — 1º Si se trazan en la esfera opaca dos círculos MN y mn, que pasen por los puntos de contacto de las tangentes AG y BD, se tiene una zona mn MN a que también corresponde una penumbra.

2º La penumbra es fácil de distinguir alrededor de la sombra que dan los árboles, las casas, los monumentos expuestos al sol. Cada vez que la luz de un foco artificial de cierta extensión, como una llama de bujía, o de lámpara, o de mechero de gas, es interceptada por un cuerpo opaco, se observa que la sombra recibida por las paredes no es nunca precisa en sus contornos, sino al contrario más o menos vaga a causa de la penumbra. Por el contrario, la penumbra se hace insensible y la sombra toma aspecto cada vez más caracterizado cuando el foco de luz se reduce a un punto luminoso: tal ocurre con el alumbrado por arco voltaico sin globo.

3º La explicación del gran fenómeno astronómico de los eclipses es una consecuencia directa de la teoría de las sombras.

459. **Imágenes suministradas por las pequeñas aberturas.** — Sea una abertura triangular O (fig. 468), practicada en la ventana de una cámara oscura, y sea ab una pantalla donde se recibe la imagen de una llama AB colocada fuera. De cada punto de la llama sale un haz luminoso divergente, que penetra en la cámara y va a formar en la pantalla una imagen triangular analoga a la abertura. El conjunto de todas estas imágenes parciales produce una imagen total de la misma forma que el objeto. Si la pantalla es perpendicular a la recta que une el centro de

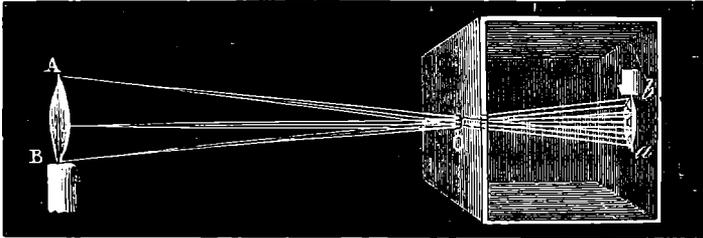


Fig. 468.

la abertura con el cuerpo luminoso, la imagen es semejante a este cuerpo; si la pantalla es oblicua, la imagen se alarga en el sentido de la oblicuidad.

Observación. — Estos dos casos se observan en las sombras que dan las hojas de los árboles: los haces luminosos que pasan al través, producen imágenes del sol que son redondas o elípticas, según sea perpendicular u oblicua a los rayos solares la superficie en que se proyectan, y con entera independencia de la forma de los intersticios por donde pasa la luz entre las hojas.

460. **Velocidad de la luz.** — La luz se propaga con velocidad tan grande que, en la superficie de la tierra y en circunstancias ordinarias, no es posible observar ningún intervalo apreciable entre el momento de producirse el fenómeno luminoso y aquel en que la vista lo percibe a una distancia cualquiera: así es que hasta el siglo XVI se admitió como evidente que la propagación de la luz es *instantánea*, o en otros términos, que su velocidad es *infinita*. Bacon fué el primero en emitir la idea de una velocidad *finita* y Galileo trató de calcularla.

I. **Métodos astronómicos.** — Bømer fué quien obtuvo los primeros números plausibles y aceptables de la velocidad de la luz, por medio de un método astronómico fundado en la observación de los eclipses de los satélites de Júpiter. Bradley empleó otro método astronómico, llamado *método de las aberraciones*.

1º **Principio del método de Bømer.** — Sábese que el primer satélite de Júpiter (el más cercano do los cuatro) efectúa sus inmersiones en la sombra proyectada por el planeta a intervalos de tiempo iguales, que son de $42^{\text{h}}28^{\text{m}}36^{\text{s}}$.

Pues bien, supongamos que se observe el instante de una primera inmersión E cuando Júpiter está en J y la Tierra en T (fig. 469); y después otra al hallarse los dos otros en

J' y en T', es decir, cuando la distancia de la Tierra a Júpiter ha aumentado en todo el diámetro de la órbita terrestre. Se encuentra que el tiempo transcurrido entre estas dos observaciones es igual a n veces $42^m 28^s 36^m$ más un exceso θ (siendo n el número de eclipses ocurridos durante el movimiento TT' de la Tierra). Evidentemente este intervalo θ , lo ha necesitado la luz para recorrer el aumento de distancia TT'. De ahí se deduce que para recorrer la distancia D de la Tierra al Sol, quiere decir la mitad

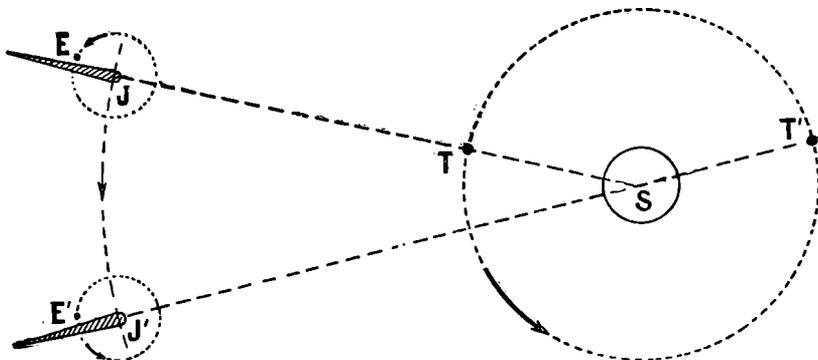


Fig. 469.

de TT', la luz tarda un tiempo t igual a la mitad de θ , y que la velocidad V de la luz está dada por la ecuación $V = \frac{D}{t}$.

El número encontrado por Rømer (48 000 leguas de 25 al grado) era poco exacto, y por tanto se ha desechado.

2º *Cálculos de Delambre.* — Delambre repitió los cálculos de Rømer, valiéndose de 5 000 observaciones, que abarcaban un período de 140 años. Halló para t el valor (mucho más exacto) de $8^m, 13^s, 243$. Cuanto a la distancia D , las observaciones relativas a los pasos de Venus en 1761 y 1769 permitieron apreciarla con aproximación muy superior a la de las evaluaciones anteriores. Delambre halló $V = 310,000$ kilómetros.

Adoptando para la paralaje el número actual de $8'', 80$, que parece más exacto, el valor de la velocidad se reduce a 299,000 kilómetros por segundo.

II. *Métodos físicos.* — Los resultados de estos métodos astronómicos han sido confirmados por medidas directas, efectuadas siguiendo dos métodos puramente físicos, el de la rueda dentada, debido a Fizeau, y el del espejo giratorio de Foucault. Estos experimentos se llevaron a cabo en Francia, en 1839 por Fizeau, por León Foucault de 1850 a 1862, por Cornu en 1874 y en fin por Perrotin de 1899 a 1902.

En América, Michelson y Newcomb han efectuado igualmente medidas de la velocidad de la luz por el método de Foucault.

Perrotin experimentó el método de Fizeau entre dos estaciones distantes 46 kilómetros (sea 92 km. de ida y vuelta); una situada en la gran cúpula del Observatorio de Niza y la otra en el monte *Vinagre* en el Esterel. La proporción media de 1 100 medidas dió, para la velocidad de la luz en el vacío, 299 880 kilómetros con una inexactitud que no pasa de 50 kilómetros*.

Agreguemos que los trabajos de Foucault lo condujeron además al resultado, importantísimo teóricamente, de que la velocidad de propagación de la luz es *más pequeña en el agua que en el aire* (663).

* *Comptes rendus de l'Académie des Sciences.* 24 nov. 1902.

Experimentos de Fizeau. — Principio del método. — El aparato de Fizeau consiste en una rueda dentada R (fig. 470) que da vueltas con gran velocidad y cuyos dientes se hallan separados por un intervalo igual a su espesor. Fizeau instaló esta ruoda y el mecanismo que la hacía girar, en Suresnes. Entre cada dos dientes pasaba un haz de luz procedente de S y reflejado por un *espejo sin azogue* G e iba a reflejarse en un espejo M colocado en Montmartre, de donde era dirigido a la ruoda. El observador veía la luz de regreso a través del espejo G. Si la ruoda, se hallaba en reposo, el haz pasaba exactamente por los mismos dientes que a la ida; pero, si giraba con rapidez suficiente

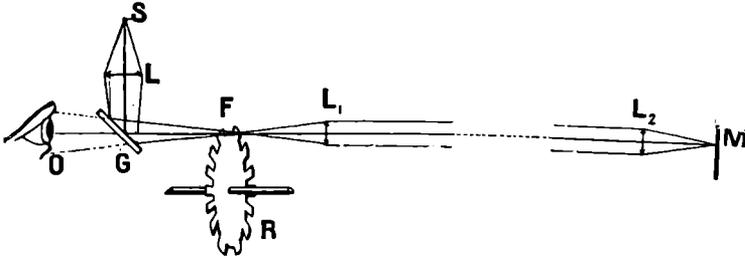


Fig. 470.

para que un diente ocupara el lugar de un intervalo, interceptábase el haz luminoso y el observador no veía nada en el anteojo con que observaba la ruoda.

El tiempo empleado por la luz en ir y volver entre Suresnes y Montmartre era, pues, igual al necesario para que un diente sucediese a un espacio vacío, y se determinaba por la medida de la velocidad de la ruoda.

OBSERVACIÓN. — Para evitar las pérdidas de luz, se recurría a las lentes L , L_1 , L_2 . L da una imagen real F de la procedencia S , imagen que está en el plano de la ruoda y coincide con el foco de L_1 ; L_1 transforma el haz de luz en un haz paralelo; L_2 concentra este haz en su foco, situado en el espejo M . Al regreso, la luz efectúa el recorrido inverso.

CAPÍTULO II

INTENSIDAD DE LA LUZ. — FOTOMETRÍA

461. **Definiciones.** — La vista permite reconocer que dos superficies están igual o desigualmente iluminadas; pero al ver dos superficies que juzgamos *desigualmente* iluminadas, no podemos decir que una está, por ejemplo, dos veces más iluminada que la otra. Por eso debemos fundar en una convención todo método de medida de la iluminación que produce un foco luminoso sobre una superficie.

La experiencia muestra ante todo que esta iluminación depende a la vez de la naturaleza del foco, de su distancia y de la inclinación de sus rayos. Supongamos, pues, dos focos diferentes iluminando sucesivamente una misma superficie *en las mismas condiciones de distancia y oblicuidad*. Si las iluminaciones producidas por los dos focos son iguales, diremos que *sus intensidades son iguales*; si la iluminación producida por el primero es *superior* a la producida por el segundo, diremos que su intensidad luminosa es mayor que la del segundo foco. Después se ha elegido un *foco tipo* (468) y, por convención, se ha tomado su intensidad como unidad. Por convención, un foco tendrá la

intensidad i si produce, en iguales condiciones de distancia y oblicuidad, la misma iluminación que i focos tipos alumbrando simultáneamente.

Iluminación. — Se llama *unidad de iluminación* la producida por este foco sobre una *pequeña** superficie colocada en posición normal a la dirección de los rayos, a la unidad de distancia. Por convención se llama iluminación 2, 3, etc., a las producidas por 2, 3, etc., focos idénticos al primero, colocados en el mismo punto e iluminando juntos la superficie considerada.

En consecuencia, un foco de intensidad i produce, en una superficie normal a los rayos y colocada a la unidad de distancia, una iluminación medida por el mismo número i que la intensidad.

462. **Leyes de la iluminación.** — *La iluminación producida sobre una pequeña superficie por un pequeño** foco varía: 1º en razón inversa del cuadrado de la distancia del foco a la superficie iluminada; 2º proporcionalmente al coseno del ángulo que forma la normal a la superficie iluminada con la dirección de los rayos luminosos.*

Estas dos leyes pueden establecerse directamente o bien demostrarse *a priori*.

I. *Estudio experimental.* — *Fotómetro de Foucault.* — 1º Puede emplearse el mecanismo del fotómetro de Bouguer, perfeccionado por Foucault (fig. 471).

Ante una pantalla transparente*** AB, colocada en el fondo de una caja de madera negra, se halla un tabique opaco MN. En P y en P₁, colócanse dos bujías idénticas, cada una de las cuales ilumina normalmente una mitad de la pantalla. Mirase a ésta, aplicando el ojo al extremo O de un tubo T, ahumado interiormente, de tal manera que, hallándose el ojo en el centro de la pantalla, se ven las dos mitades en las mismas condiciones. El tabique MN se mueve según su propia dirección; disponiéndole convenientemente, se puede procurar que los dos campos iluminados respectivamente por cada una de ambas bujías, estén contiguos, sin introducirse uno en otro y sin que entre ellos presenten ningún intervalo oscuro; y así, nos encontramos en condiciones inmejorables para comparar las iluminaciones.

Sí las dos bujías son exactamente idénticas, las iluminaciones serán iguales cuando lo sean las distancias d y d_1 de las bujías a las pantallas. Pero, si separamos la bujía P₁ a doble distancia (en P₂), se observa que hace falta añadir tres bujías más, para restablecer la igualdad de iluminación; luego la iluminación producida por una sola bujía a la distancia $2d$ es la cuarta parte de la iluminación que produce a la distancia d . Del

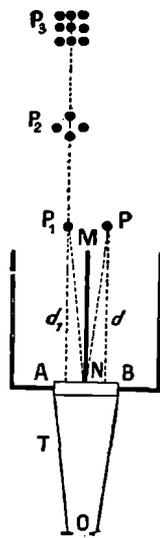


Fig. 471.

* Se considera una superficie pequeña, con objeto de que todos sus puntos sean iluminados por igual.

** Suficientemente pequeño para que pueda considerarse como un punto.

*** Foucault componía esta pantalla, con una capa de almidón muy fino depositada entre dos láminas de cristal.

mismo modo, en P_3 , a triple distancia de la primera, se nota que, para restablecer la igualdad de iluminación, es necesario poner 9 bujías idénticas. Luego, a la distancia $3d$, una bujía ilumina nueve veces menos que a la distancia d .

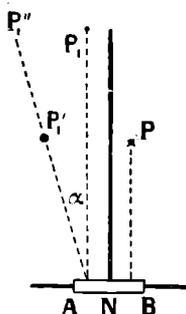


Fig. 472.

El experimento resulta también en caso de que los focos $P_1P_2P_3$ iluminen oblicuamente la pantalla AN, pero con la misma oblicuidad*, en vez de efectuarlo normalmente.

2º Ley de los cosenos. — Después de realizar la igualdad de iluminación de los dos focos, en las posiciones P y P_1 (fig. 472), se coloca el foco P_1 en P_1'' , de manera que sus rayos caigan oblicuamente sobre la pantalla AN, sin que deje de ser constante la distancia d_1 a AN; y se verá que la iluminación disminuye. Para restablecer la igualdad de las iluminaciones de los dos campos, es necesario acercar el foco a P_1' , a una distancia d'_1 menor que d_1 . Sea e el valor de la iluminación común de ambos campos y e' la iluminación de AN cuando el foco está en P_1'' a la distancia d_1 . En virtud de la ley anterior, tendremos :

$$\frac{e'}{e} = \frac{d_1^2}{d'^2}$$

De donde se deduce que $\frac{d'^2}{d_1^2} = \cos^2 \alpha$, lo cual demuestra la ley de los cosenos.

II. *Demostación teórica.* — Se funda en la hipótesis de que la luz emitida por un foco es un flujo de energía vibratoria que procede de vibraciones de las moléculas luminosas (663). De ahí, dedúcese que la iluminación de una superficie debe ser proporcional a la cantidad de energía luminosa que cae sobre cada unidad de esta superficie durante la unidad de tiempo. Esta definición concuerda con la definición experimental precedente. En efecto, si se ilumina una misma superficie por n focos idénticos colocados

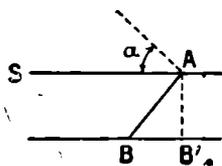


Fig. 473.

en el mismo punto, es evidente que esta superficie recibe n veces más energía que si estuviera iluminada por un solo foco; luego, conforme a la segunda definición como a la primera, la iluminación está multiplicada por n .

1º. *Ley de las distancias.* — Sea E la cantidad de energía luminosa que el foco comunica al medio, durante la unidad de tiempo; podríamos demostrar, del mismo modo que lo hemos hecho respecto del sonido (421), que la cantidad de energía que recibe una superficie igual a 1, colocada en posición

normal a los rayos a la distancia R es igual a $\frac{E}{4\pi R^2}$; luego,

varía en razón inversa del cuadrado de la distancia de la superficie al foco.

2º *Ley del coseno.* — Consideremos una superficie AB de área s (fig. 473) colocada

* El experimento efectuado con bujías carece de precisión, por la variabilidad de iluminación que produce una misma bujía y la imposibilidad de encontrar dos idénticas. Se puede emplear lamparillas de esencia de petróleo, que darán más exactitud en los resultados. Poniendo una en P y otra en P_1 , se arregla la mecha de ésta de modo que las iluminaciones de los dos campos sean iguales. Se quita la que está en P_1 y se pone otra y se arregla su mecha. Se repite esta operación con otras lamparillas, y de este modo se tienen focos de luz de igual intensidad, que sirven para hacer mejor el experimento.

bastante lejos de un foco para que todos los rayos que proceden de éste y caen sobre AB puedan ser considerados como paralelos. Sea α el ángulo de la normal a AB con la dirección de los rayos. Tracemos la superficie AB', de área σ , normal a los rayos luminosos. Las dos superficies BA y B'A reciben en la unidad de tiempo la misma cantidad E de energía luminosa; la iluminación e de AB es proporcional a la energía $\frac{E}{s}$ que recibe la unidad de superficie. So tiene pues $e = k \frac{E}{s}$, siendo k constante; de la misma manera la iluminación de AB' será

$$e' = k \frac{E}{\sigma}, \quad \text{de donde} \quad \frac{e}{e'} = \frac{\sigma}{s}.$$

Pero se tiene

$$\frac{\sigma}{s} = \cos \alpha, \quad \text{luego} \quad \frac{e}{e'} = \cos \alpha.$$

Otra superficie cuya normal estuviera inclinada de α_1 tendria una iluminación e_1 tal como

$$\frac{e_1}{e} = \cos \alpha_1, \quad \text{luego} \quad \frac{e}{e_1} = \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_1}.$$

3º. *Flujo de luz.* — Se ha convenido en llamar *flujo de luz que cae sobre una superficie* al producto $\Phi = es$ del área de esta superficie por su iluminación. Según lo que precede, esta magnitud es proporcional a la energía vibratoria luminosa que cae sobre la superficie durante la unidad de tiempo.

Se ve que la iluminación de una superficie es igual al flujo de luz que cae sobre su unidad de área.

463. Comparación de las intensidades de dos focos luminosos. — Medidas fotométricas. — Para comparar las intensidades de dos focos se los prepara de modo que alumbrén igualmente una misma superficie S o dos superficies próximas en las mismas condiciones de oblicuidad.

Sean en este caso i i' las intensidades de los focos; d , d' sus distancias respectivas a S, α la inclinación común de sus rayos luminosos sobre la normal a la superficie; la iluminación normal producida por el primer foco a la unidad de distancia es i , a la distancia d es $\frac{i}{d^2}$, conforme a la ley de las distancias; en fin, bajo la inclinación α es $e = \frac{i}{d^2} \cos \alpha$, conforme a la ley del coseno. Asimismo, la iluminación del segundo foco es $\frac{i'}{d'^2} \cos \alpha$. Como estas iluminaciones han resultado iguales, se tiene

$$\frac{i}{d^2} \cos \alpha = \frac{i'}{d'^2} \cos \alpha; \quad \text{de donde} \quad \frac{i}{i'} = \frac{d^2}{d'^2}. \quad [1]$$

Podemos enunciar este resultado de la manera siguiente :

Las intensidades de dos focos luminosos son proporcionales a los cuadrados de sus distancias a una misma pantalla que alumbran igualmente en la misma oblicuidad.

La comparación de las intensidades se hace por medio de *fotómetros*. Por ejemplo, si se emplea el fotómetro de Foucault para comparar la intensidad de dos focos luminosos, se colocan estos focos delante del fotómetro de tal manera que las dos mitades de la pantalla estén iluminadas igualmente; se miden las distancias d y d' de los dos focos a la pantalla y se aplica la ecuación que precede.

464. **Fotómetro de Rumford.** — Consta de una pantalla translúcida E ante la que se coloca una barra o varilla m (fig. 474) opaca. Los focos S y S' se disponen a cierta distancia, y cada uno de ellos proyecta en la pantalla una sombra de la varilla.

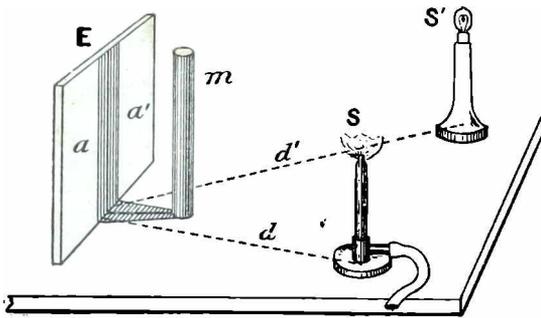


Fig. 474.

La sombra a dada por S es una región de la pantalla que sólo está iluminada por S; del mismo modo, la sombra a' está iluminada por S' únicamente. Se mueven los fo-

cos, de manera que las dos sombras parezcan igualmente iluminadas y que, al mismo tiempo, las direcciones S a , S' a' estén inclinadas del mismo modo contra la pantalla. Para apreciar la igualdad de las iluminaciones, conviene que las sombras sean perfectamente contiguas.

Mídese las distancias d y d' de cada foco a la sombra que éste ilumina, y se aplica la fórmula [1].

465. **Fotómetro de Bunsen.** — En el fotómetro *de mancha* de Bunsen, la igualdad de iluminación se produce en una *mancha de aceite* colocada en el centro de una pantalla de papel blanco.

Vista la mancha por difusión, es más oscura que el papel, y lo

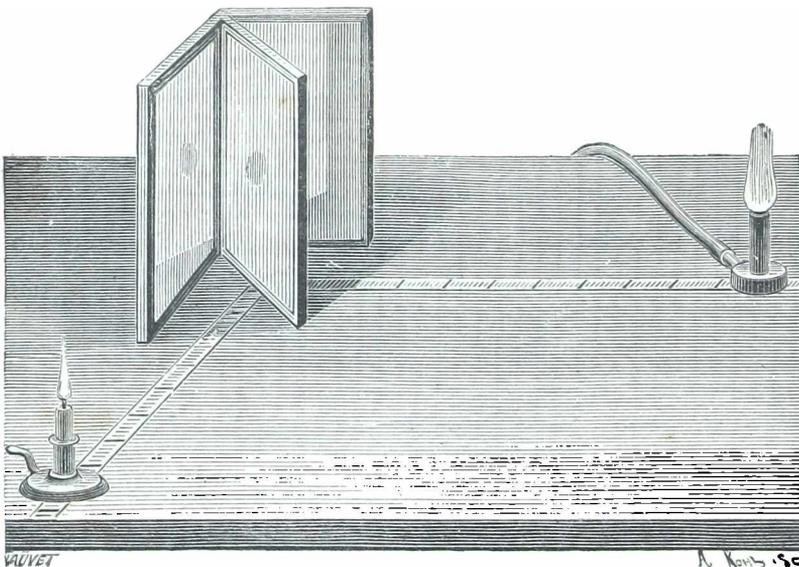


Fig. 475.

contrario por transparencia. Colócase esta pantalla entre las dos luces que se van a comparar, en la recta que las une, y se la va moviendo la pantalla hasta que la mancha desaparezca, quedando la hoja blanca

uniformemente iluminada; en este momento son iguales las iluminaciones: sólo falta medir las distancias respectivas d y d' de cada foco luminoso a la pantalla.

Disponiendo dos espejos planos, igualmente inclinados a cada lado del marco (fig. 475), se verán una junto a otra las imágenes de las caras de la mancha, y será más fácil observar el momento de su desaparición.

OBSERVACIÓN. — Sea cual fuere el fotómetro empleado, el momento preciso en que los campos iluminados por los dos focos alcancen el mismo grado de iluminación es muy difícil de determinar, sobre todo si los dos focos de luz no tienen igual coloración, como generalmente ocurre.

466. **Fotómetros perfeccionados.** — Los grandes progresos a que han llegado, en estos últimos años, los procedimientos de alumbrado, han inducido a perfeccionar de muy distintas maneras los aparatos que acabamos de estudiar y a construir otros, fundados en principios diferentes. Vamos a citar algunos.

I. *Fotómetro de Cornu.* — Compónese de dos lentes convergentes L y L' (fig. 476). Delante de la lente L hay un diafragma de abertura variable D que se ilumina con el foco de luz que se estudia. La lente da una imagen real de este foco, imagen que se observa por medio de un ocular O . La otra lente, L' , proyecta al mismo tiempo la imagen de la llama de una peque-

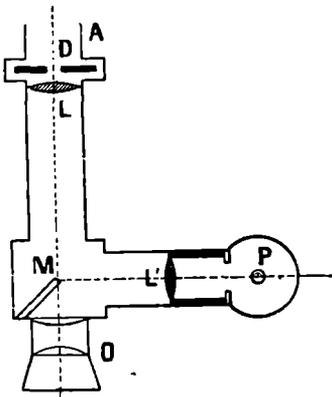


Fig. 476.

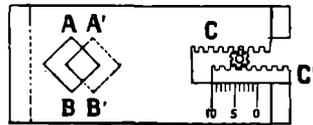


Fig. 477.

ña lámpara de petróleo P , que ofrece brillo constante, si se usa siempre la misma esencia. Los rayos procedentes de L' se transmiten al ocular, por medio de un espejo M de 45° , de modo que el ojo, que mira a través de O , ve las imágenes del foco estudiado y de la lámpara P al lado una de otra.

La igualdad de resplandor de estas dos imágenes se realiza mediante un diafragma D , conocido con el nombre de *ojo de gato*, que presenta la disposición siguiente. Compónese de dos placas metálicas que resbalan una sobre otra por efecto de un piñón común a las dos cremalleras C y C' (fig. 477). Ambas placas poseen una abertura cuadrada. De este modo, al girar el piñón, puede hacerse variar la superficie del diafragma, continuando fijo el centro del cuadrado que constituye su abertura.

Ante todo, debe regularse el aparato. Para conseguirlo, se coloca ante L , a la distancia a que se colocarán luego los focos por estudiar, un foco tipo, de intensidad conocida I , y se busca la abertura conveniente del diafragma. Sea n el número de divisiones leídas en la escala del ojo de gato y que indica su abertura. Cuando se emplea el foco por estudiar, de intensidad desconocida I' , es preciso, para establecer la igualdad de brillo, dar al ojo de gato una abertura medida por n' divisiones. Las intensidades I' e I son inversamente proporcionales a las superficies de abertura del ojo de gato, las cuales están, a su vez, en la relación n^2 a n'^2 . Luego

$$\frac{I'}{I} = \frac{n^2}{n'^2}.$$

OBSERVACIONES. — 1ª Este aparato se emplea en el *pirómetro óptico* de Le Châtelier (242).

2ª En caso de que el foco sea mucho más intenso que la lámpara P , que es el caso

de la pirometría, se disminuyo su luz por cristales absorbentes, medidos de antemano, colocados en A.

3ª En pirometría, sólo deben compararse las radiaciones rojas de los focos; para lo cual se interpone un cristal rojo ante el ocular.

II. *Caso de dos focos de diferente color.* — *Espectrofotómetros.* — En caso de que los focos que se comparan tengan colores diferentes, las medidas fotométricas son poco precisas. Govi ideó descomponer la luz de cada foco por un prisma y comparar sólo las partes correspondientes de cada espectro.

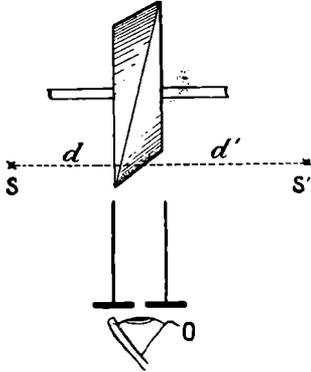


Fig. 478.

Los aparatos empleados denominanse *espectrofotómetros*. Desgraciadamente, son instrumentos harto complicados para la práctica industrial.

III. *Fotómetro de centelleo (de Symmance y Abady).* — Este aparato (fig. 478) está formado por un disco grueso, de mármol o yeso, cuyo contorno está abatido de manera que tiene forma de dos troncos de cono de bases circular y elíptica acoplados. El plano de base común separa la llanta en dos superficies simétricas. Los dos focos que se compara, colócanse lateralmente en S y S'. Se hace girar el disco y, durante esta rotación, los focos luminosos iluminan alternativamente cada cara de la llanta. Si las iluminaciones son desiguales, el ojo, colocado en O, observa un fenómeno de centelleo, que cesa si se modifican convenientemente las distancias d y d' de los focos. Entonces, sus intensidades I e I' están en la relación de d^2 a d'^2 .

El interés de este aparato estriba en que la precisión de la medida no disminuye aunque haya gran diferencia de coloración en los focos. En efecto, estas diferencias de color desaparecen en el instante en que el centelleo cesa y sólo se distingue un colorido único, intermedio entre los de los focos.

467. *Focos extensos.* — *Brillo intrínseco.* — Hasta aquí hemos supuesto el foco luminoso tan pequeño, que pudiera ser considerado como un punto; pero éste no es siempre el caso de los focos luminosos reales. Consideremos una superficie luminosa plana AB, de área s (fig. 473) que envíe rayos en la dirección AS; ella produce en una pequeña superficie normal a AS cierta iluminación, funcionando como un foco de intensidad I . Llamaremos *brillo intrínseco* del foco AB en esa dirección a la relación entre I y la *superficie aparente* de AB en la dirección AS. (Llamaremos *superficie aparente* de AB en la dirección AS, a la proyección $AB' = \sigma$ de AB sobre un plano perpendicular a la dirección AS: para un observador que mire desde un punto lejano hacia la dirección AS, el foco AB parece que en efecto se confunde con AB'). Por consiguiente, el brillo es

$$K = \frac{I}{\sigma}.$$

Esta cualidad de un foco es la que hace que nos parezca más o menos brillante. En efecto, de dos focos de intensidades iguales, el más brillante es el que posee la menor superficie aparente. Esto concuerda perfectamente con la definición del brillo, el cual varía en razón inversa de la superficie aparente.

La experiencia prueba que si se inclina un foco luminoso plano, tal como AB, un ángulo α variable, su brillo en una dirección AS no varía. Por esta razón una esfera luminosa, tal como el sol, nos parece un disco de brillo uniforme aunque sus diversas regiones estén desigualmente inclinadas hacia la dirección de los rayos que llegan a nuestra vista. Por consiguiente se tiene

$$I = K\sigma = Ks \cos \alpha,$$

siendo K constante, cualquiera que sea α .

La intensidad de un foco plano, en la dirección AS, es por lo tanto *proporcional a la extensión s de ese foco y al coseno del ángulo que forma su normal con la dirección AS de los rayos luminosos*. Luego tenemos para la luz emitida por un foco plano AB la misma ley del coseno que para la luz recibida.

468. *Tipos de luz.* — La Conferencia internacional de 1884 adoptó como *unidad práctica* de luz blanca el tipo propuesto por M. Violle, a

saber, la intensidad luminosa en la dirección normal, de 1 centímetro cuadrado de platino, a la temperatura de solidificación.

Como esta unidad es demasiado grande en la práctica, el Congreso de electricistas de 1889 adoptó la *bujía decimal*, igual a $1/20$ del tipo *Violle*.

La unidad usada hasta ahora con más frecuencia en Francia era el *mechero Carcel*, que es la intensidad luminosa de una lámpara Carcel que quema 42 gramos de *aceite de colza refinado* en una hora*. El tipo *Violle* vale 2,08 *mecheros Carcel*.

En Inglaterra, la antigua unidad práctica, el *Candle*, ha sido reemplazada por el tipo de gas metano de Vernon-Harcourt, que vale 9,9 bujías decimales.

En Alemania, la antigua unidad, el *Kerzen*, ha sido reemplazada por el tipo Hefner, de acetato de amilo, que vale 0,89 bujía decimal.

Iluminación. — La unidad práctica de iluminación es la *bujía-metro* o *lux* : es la iluminación normal que da una bujía decimal colocada a 1 metro de distancia. Se necesitan de 20 a 30 *lux* o bujías en un punto cualquiera de un local para que esté suficientemente alumbrado. Para poder trabajar bien en una mesa de lectura, se necesitan por los menos 30 bujías. La vista aguanta sin cansarse la luz de 200 bujías de una sala. Por otra parte, el sol da 75 000 bujías de luz; la luz difusa del día es de más 19 000 bujías, mientras que la luz de la luna llena no es más que un cuarto de bujía.

469. *Estudio de diversos focos.* — 1°. *Brillo intrínseco.* — El brillo intrínseco de un foco depende más especialmente de la temperatura del foco : para una bujía el brillo intrínseco es 0,5 bujía por cm^2 ; para una lámpara eléctrica incandescente, de 65 a 150; para el arco voltaico, de 15 000 a 35 000.

2°. *Intensidades en las diversas direcciones.* — Los focos luminosos que se emplean, no todos poseen intensidades iguales en todas las direcciones, como lo haría un solo punto luminoso o una esfera de brillo uniforme. Sin embargo, este es el caso de una llama de gas, de una mariposa, por ejemplo, que alumbraba igualmente en todas las direcciones : eso prueba que la llama es perfectamente transparente, propagándose en todas direcciones, sin ser detenida, la luz que emite cada partícula luminosa de carbón incandescente. Además, el brillo de la llama varía según la dirección en que se la mira. Vista por su corte parece más brillante que vista de frente. Esto depende de que en el primer caso posee menor superficie aparente que en el segundo, dada una misma intensidad.

Este no es el caso de una llama aplanada de lámpara de petróleo que alumbraba menos en su plano que en las direcciones perpendiculares; por consiguiente esta llama es menos transparente que la del gas.

Caso del arco eléctrico. — Cuando está alimentado por una corriente continua (1002), el carbón positivo se ahueca en cráter que es la parte más brillante del arco : la intensidad será más fuerte en las direcciones en que la luz que emite no esté velada por el otro carbón. Será máxima en una dirección que tenga 45° con el carbón negativo. Para un arco alimentado por dos corrientes alternativas, siendo igual el aspecto de los dos carbones, la repartición de las intensidades es simétrica con relación al plano perpendicular a los carbones que pasan por el arco, estando poco más o menos a 45° de los carbones las direcciones de intensidad máxima.

* Con una llama de 40 mm. y en las condiciones sentadas por J. B. Dumas y Regnault para la verificación del poder iluminante del gas en Paris.

CAPÍTULO III

REFLEXIÓN DE LA LUZ. — ESPEJOS PLANOS

470. **Difusión y reflexión regular.** — **Espejos.** — Si, por un orificio practicado en la contraventana de un cuarto oscuro, se deja penetrar un haz de luz solar y se coloca una hoja de papel blanco en el trayecto de los rayos, la luz se propaga en todas direcciones, por delante del papel. Ésta ilumina de este modo la sala y se la puede ver, aplicando el ojo a un punto cualquiera. Dícese que la hoja de papel *difunde* la luz : el fenómeno que se produce se denomina *difusión* de la luz.

Todos los cuerpos mates ejercen análoga acción sobre la luz.

Pero, si se reemplaza la hoja de papel por una superficie muy brillante, la mayor parte de luz — excepto una porción difundida que permite ver de cualquier sitio la parte atacada, — es devuelta en una sola dirección que puede seguirse por la iluminación del polvo que hay en su trayecto. Este es el fenómeno de la *reflexión* de la luz.

La reflexión se origina siempre que la luz corta a la superficie de separación de dos medios diferentes (503); pero, cuando el segundo medio es transparente (agua, cristal, etc.), gran parte de la luz penetra en él. Los medios brillantes, reflejan, por el contrario, gran proporción de luz.

En general, los cuerpos brillantes que reflejan la luz se denominan *espejos*.

471. **Leyes de la reflexión.** — Llámense *rayos incidentes* los que caen en el espejo. Cada uno de ellos da lugar a un *rayo reflejado*. *Plano de incidencia* de un rayo es el plano que pasa por este rayo y que es perpendicular a la superficie del espejo (está determinado por el rayo y por la *normal* al espejo en el punto de incidencia); los *ángulos de incidencia y de reflexión* son los formados respectivamente por la normal con los rayos incidente y reflejado. Las leyes del fenómeno son las siguientes.

LEYES. — 1ª. *El rayo reflejado queda en el plano de incidencia.*

2ª. *El ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.*

Estudio experimental. — Colócase verticalmente un círculo graduado M (fig. 179), en cuyo centro está fijo un anteojo, móvil en un plano paralelo al limbo. Dispónese además a conveniente distancia, un baño de mercurio, cuya superficie libre constituye una superficie reflectora perfectamente plana y horizontal*. Hecho esto, se mira con el anteojo, siguiendo una dirección OE, una estrella de primera o de segunda magnitud; y

* En el Observatorio de Paris, se emplea, en las observaciones astronómicas el *baño pelicular* de Perigaud.

El aparato se compone de un platillo de hierro colado RR (fig. 180), separado de su borde por una media caña de 1 a 5 mm. de grueso, que comunica por un tubo con un cilindro P, donde hay mercurio que puede ser enviado al platillo por medio de un émbolo

después se inclina el anteojo de manera que se distinga por reflexión la misma estrella según $O'I$ en el baño de mercurio. Esto ocurre cuando se reciben en el anteojo los rayos reflejados IA , que corresponden a los incidentes $E'I$ que proceden de la estrella. Pues bien, se observa que las dos direcciones sucesivas del anteojo, y por consiguiente los dos rayos EA e IA , forman ángulos iguales con la horizontal AH . En efecto, siendo IE la normal a la superficie del mercurio, esta recta es perpendicular a AH , el triángulo AIE es isósceles y los ángulos AIE y AEI son iguales; pero como los dos rayos luminosos AE e IE' son paralelos por causa de su gran distancia a la estrella, los ángulos AEI y EIE' son iguales por alternos-internos: luego $EIE' = EIA$.

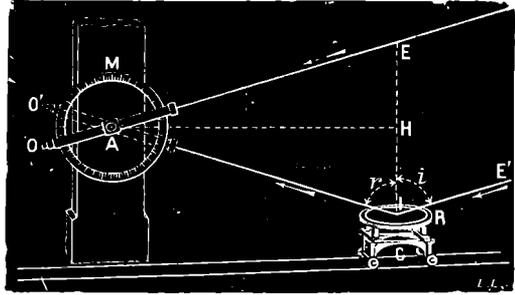


Fig. 479.

472. Formación de las imágenes en los espejos planos. — Si, delante de un espejo plano, se coloca un cuerpo luminoso, por ejemplo, la llama de una bujía, o simplemente un cuerpo iluminado, se ve en el espejo una *imagen* del cuerpo. Cada punto de la imagen es simétrico al punto correspondiente del objeto con relación al plano del espejo.

Este fenómeno puede probarse del modo siguiente. En una hoja de papel P , instalada en una mesa, se coloca una lámina de cristal M (fig. 481, I), plana y delgada, perpendicular al papel (sirviéndose, por ejemplo, de una escuadra). Señalando, en el papel un punto A , un ojo, colocado en O , cree ver, por detrás, en A' , una imagen del punto A : y,

de inmersión. El aparato entero está sostenido por tres tornillos de nivel, *que permiten poner el platillo sensiblemente horizontal.*

Para servirse del baño, se empieza por limpiar bien el platillo y por ponerlo horizontal, y después se dan vueltas al tornillo del émbolo, para hacer salir el mercurio. Éste empieza por llenar la media caña y después se extiende sobre el platillo. Supongamos que para cubrir enteramente el platillo sea necesario dar 4 vueltas al tornillo; entonces se puede — cosa rara — hacer volver el mercurio al depósito dando al tornillo 3 vueltas y $\frac{1}{4}$, *sin que el espejo se deforme, y sin que se altere la horizontalidad.* En el platillo no queda más que una capa de metal muy fina. Su grueso, que era al principio de 3 mm., se reduce a $\frac{3}{4}$ mm. próximamente. En

este momento, las imágenes de los objetos aparecen mucho más brillantes y perceptibles, no obstante las trepidaciones del suelo.

Si se pasa el límite indicado de $\frac{3}{4}$ mm., el espejo se rompe, como haría un muelle o una membrana demasiado tensa.

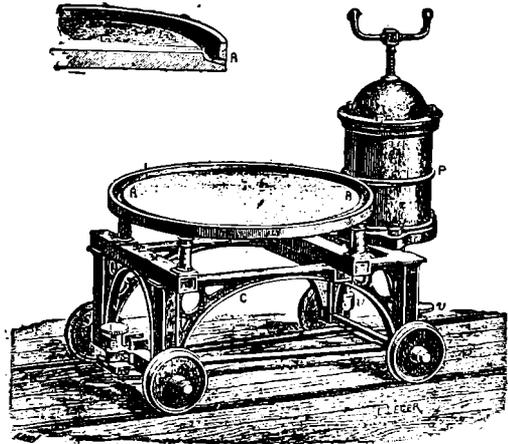


Fig. 480.

como el cristal es transparente, se puede marcar con un lápiz ese punto A' *.

Asimismo, trázase también la intersección CDB del espejo y del papel, y entonces es fácil darse cuenta de que los puntos A, A' son simétricos con relación a BC ; es decir que AA' es perpendicular a BC y que DA y

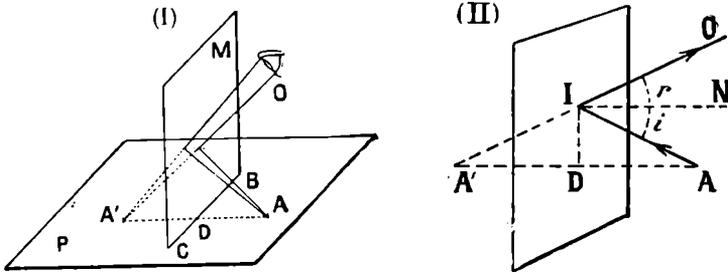


Fig. 481.

DA' son iguales. Con instrumentos a propósito, se puede aumentar la exactitud de tal experimento.

473. **Demostación de las leyes.** — El punto A (fig. 481, II), emite rayos luminosos en todas direcciones; algunos de los reflejados en el espejo van a parar al ojo colocado en O . Desde el momento en que el ojo cree ver un punto luminoso en el punto simétrico de A es porque las prolongaciones de los rayos reflejados pasan evidentemente por ese punto simétrico; pues, entonces, para el ojo, todo ocurre lo mismo que si realmente hubiera en dicho punto un punto luminoso.

Consideremos uno de los rayos incidentes AI (fig. 481, II), como la prolongación del rayo reflejado IO encuentra a la perpendicular AD bajada desde el punto A al espejo, es preciso que IO esté en el plano de AI y de AD , plano que se confunde con el de incidencia; por lo tanto, queda demostrada la primera ley de la reflexión.

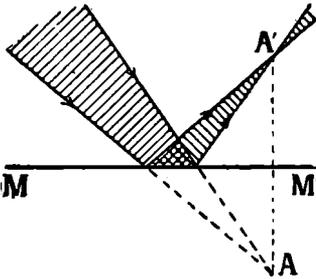


Fig. 482.

Por otra parte, los triángulos rectángulos AID y $A'ID$ son iguales, por tener iguales los ángulos en D , como rectos, un lado ID común e iguales los lados AD y DA' según el experimento anterior. Por consiguiente, serán iguales los ángulos $DA'I$ y DAI , así como también los AIN (ángulo de incidencia) y NIO (ángulo de reflexión) que son respectivamente iguales a DAI y $DA'I$, lo cual establece la segunda ley.

OBSERVACIONES. — 1ª *Principio del regreso inverso de la luz.* — Si un rayo luminoso siguiese la dirección OI , tomaría, en virtud de las

OBSERVACIONES. — 1ª *Principio del regreso inverso de la luz.* — Si un rayo luminoso siguiese la dirección OI , tomaría, en virtud de las

* Por este sencillo procedimiento, se puede reproducir un dibujo colocado a la derecha del espejo.

leyes de la reflexión, la dirección IA del antiguo rayo incidente. Este fenómeno constituye el principio del *regreso inverso de la luz en la reflexión*.

2ª *Imagen virtual e imagen real*. — La imagen A' de un punto A sólo existe en apariencia, pero no realmente: se la denomina *imagen virtual*. Pero si se hace incidir sobre un espejo MM' (482)* un haz de luz dirigido hacia un punto A'' , situados detrás del espejo, en virtud de las leyes de la reflexión, el espejo enviará la luz hacia el punto simétrico A' , que en este caso será un punto luminoso *real*. Se le puede ver, sea dirigiendo la visual al haz reflejado *más allá de A'* sea colocando en A' una pantalla, en la cual producirán los rayos reflejados una manchita luminosa.

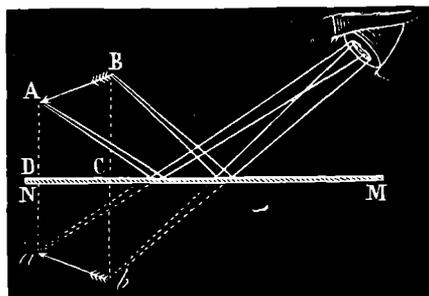


Fig. 483.

474. *Imagen de un objeto luminoso en un espejo plano*. — Es evidente que, para obtener la imagen de un objeto luminoso cualquiera AB (fig. 483), bastará construir, según la regla mencionada, la imagen de cada uno de sus puntos. Se ve que los espejos planos producen imágenes *simétricas*, de los objetos.

Generalmente, el objeto y la imagen no pueden coincidir. Están, entre sí, como la mano derecha y la izquierda.

La figura 483 representa también la marcha de los rayos emitidos por cada extremo AB reflejados en un espejo y recibidos, luego, por el ojo de un observador.

475. *Campo de un espejo plano*. — Supongamos que el ojo O de un observador esté mirando un espejo plano limitado MM' (fig. 484).

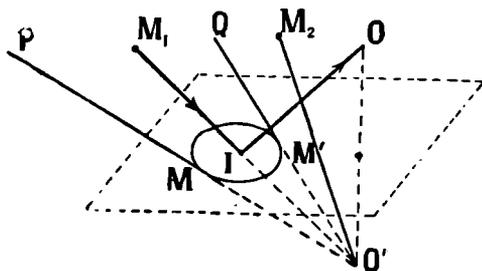


Fig. 484.

Se llama *campo del espejo*, para esta posición del ojo, el sitio de los puntos del espacio, cuya imagen puede ver el ojo por reflexión en el espejo.

Tomemos el simétrico O' del punto O con relación al plano del espejo y tracemos, de O' como vértice, una superficie cónica que tenga por base el espejo MM' . El campo es la porción del espacio $PQMM'$ limitada por esta superficie cónica y por el mismo espejo. En efecto, sea un punto luminoso M_1 en lo interior de esta región; para que un rayo pro-

* Se supone que el espejo es perpendicular al plano de la figura; entonces se lo representa por su trazado MM' en el plano de la figura; el haz de luz está indicado con el plumado trazado entre los rayos extremos de este haz.

** Con un espejo esférico cóncavo o con una lente convergente, se puede, de este modo hacer *converger un haz de luz hacia un punto*.

cedente de este punto pueda llegar al ojo O, es preciso evidentemente que venga de M_1 siguiendo una dirección M_1I yendo hacia O' ; este rayo encuentra efectivamente el espejo que lo refleja en O. Pero un punto M_2 exterior a P y MM' no puede ser visto por reflexión, porque el rayo M_2O' no encuentra el espejo, luego M_2 no está dentro del campo.

476. **Espejos inclinados. — Imágenes múltiples.** — Cuando se coloca un objeto entre dos espejos cuyos planos se cortan según un ángulo más o menos agudo, se ven imágenes múltiples, cuyo número aumenta con la inclinación de los espejos.

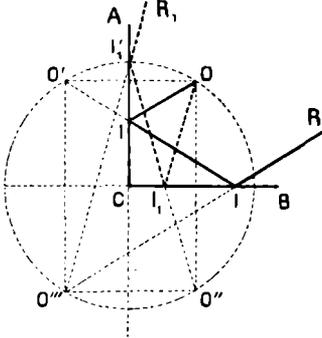


Fig. 485.

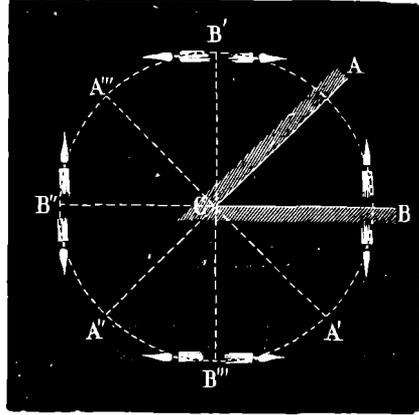


Fig. 486.

Espejos perpendiculares. — Los rayos que emanan del punto luminoso O (fig. 485), parecen, después de su primera reflexión sobre CA, que proceden del simétrico O' ; y después de una segunda reflexión sobre CB, parece que proceden de O'' . Del mismo modo, después de una primera reflexión sobre CB, los rayos divergen de O'' ; al cabo de dos reflexiones, la primera sobre CB y la segunda sobre CA, divergen del mismo punto O'' que los precedentes. Por lo tanto, hay *tres imágenes* que, con el mismo punto O, ocupan los vértices de un rectángulo inscrito a una circunferencia cuyo centro es C.

Espejos de 60°. — Se forman *cinco imágenes*.

Espejos de 45°. — Se producen *siete imágenes* (fig. 486).

El número de imágenes continúa creciendo así a medida que disminuye el ángulo.

Aplicación. — Se obtienen muy buenos efectos disponiendo espejos en las caras de

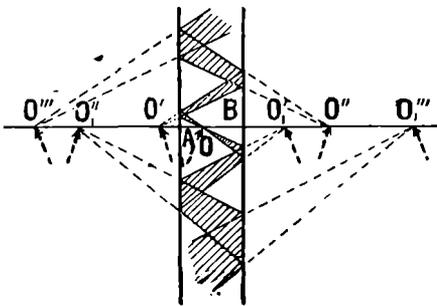


Fig. 487.

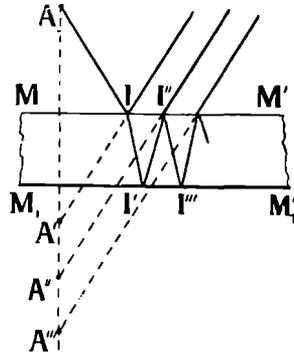


Fig. 488.

una sala poligonal. Las múltiples imágenes producidas por los espejos reproducen gran número de veces los objetos colocados en la sala y dan origen a ilusiones extraordinarias.

477. **Espejos paralelos. — Imágenes múltiples.** — Si se tienen dos espejos paralelos, el

numero de imágenes de los objetos colocados entre ellos es *teóricamente infinito*. Los rayos emitidos por un punto O (fig. 487) y reflejados primero en el espejo A divergen sucesivamente de los puntos O_1 ($AO' = OA$); O'' ($BO'' = BO'$); O''' ($AO''' = AO''$), etc. Estos reflejados primero en B producen las imágenes O'_1 ($BO'_1 = BO$); O''_1 ($AO''_1 = AO'_1$); O'''_1 ($BO'''_1 = BO''_1$), etc.

En realidad, el numero de imágenes es limitado, porque, como la luz incidente nunca se refleja del todo, las imágenes pierden cada vez mas su brillo y acaban extinguiéndose por completo.

478. **Espejos estañados.** — Los espejos metálicos no tienen más que una sola superficie reflectora: pero los estañados presentan, primero, una superficie anterior de vidrio MM' (fig. 488) y luego una capa de amalgama metálica, llamada *estño*, que cubre la parte posterior M_1M_1' . Los rayos, tales como AI , procedentes de A, se reflejan en parte en la primera cara, como si vinieran de A' . Pero una parte de la luz que ha atravesado el cristal se refleja en el estño en I' y parece que proviene de la imagen A'' . Otra parte de la luz se refleja interiormente en la cara superior en I'' y luego en el estño en I''' , y produce la imagen A''' , y así sucesivamente.

Por lo demas, como cada una de estas reflexiones va acompañada de refracción y de difusión, hay una pérdida de luz considerable que debilita las imágenes y acaba por hacerlas invisibles. En la figura 489 pueden verse las imágenes multiples de una bujia cuando se mira oblicuamente la cara reflectora de una lámina de vidrio de caras paralelas que constituye un espejo analogo a los estañados.

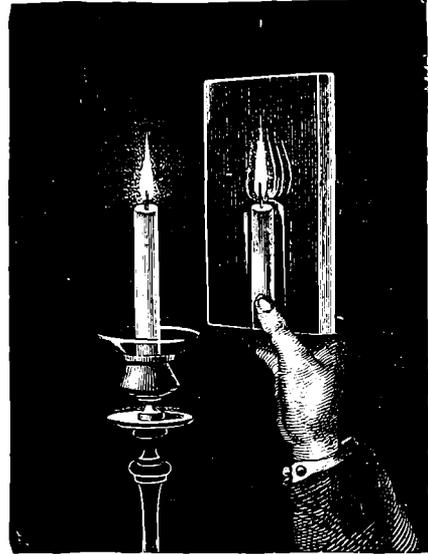


Fig. 489.

479. **Problema del espejo giratorio.** — Cuando se hace girar un espejo M un ángulo θ alrededor de un eje O situado en su plano (fig. 490), la imagen de un punto luminoso A experimenta un movimiento angular doble del que tiene el espejo, y lo mismo ocurre con un rayo reflejado IR cualquiera.

En efecto, describamos desde el punto O como centro, con un radio igual a OA, un círculo que servirá para valorar suficientemente los movimientos angulares. Las imágenes A' y A'_1 son simétricas del punto A respecto de las dos posiciones M y M_1 del espejo. Ahora bien, el ángulo de

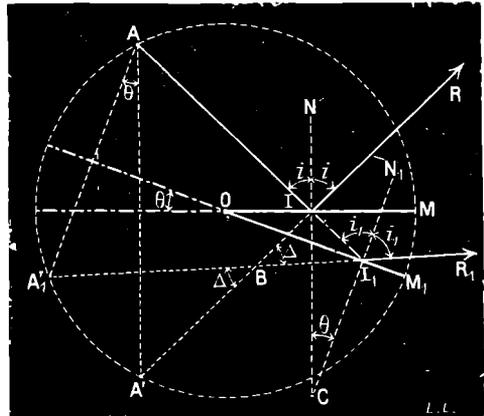


Fig. 490.

las dos normales $AA'A_1$ es evidentemente igual a θ , y como es un ángulo inscrito, que tiene por medida la mitad del arco A'_1A' , resulta que este arco es igual a 2θ .

Consideremos ahora un rayo cualquiera AI , que se refleja en IR , en

la primera posición del espejo. Cuando éste va a M_1 , el mismo rayo incide en I_1 , y se refleja según $A'I_1R_1$. El ángulo que el rayo reflejado acaba de girar es $\Delta = R_1 BR$. Ahora bien, en el triángulo BI_1R_1 , el ángulo externo II_1R_1 da

$$2i_1 = 2i + \Delta,$$

de donde

$$\Delta = 2(i_1 - i);$$

y en el triángulo CH_1 , se tiene el ángulo externo $i_1 = i + \theta$,

de donde

$$\theta = i_1 - i, \text{ luego } \Delta = 2\theta.$$

480. **Determinación de los pequeños ángulos de rotación. — Métodos de Kelvin y de Pogendorff.** — Cuando se quiere descubrir los movi-

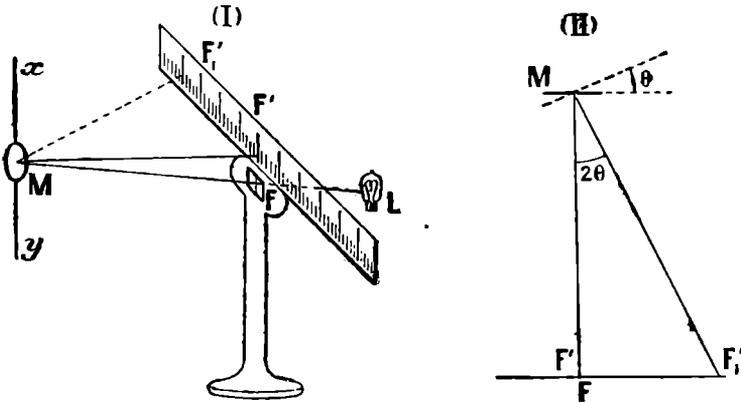


Fig. 491.

mientos de un eje de rotación xy (fig. 491. I) se le adapta un espejito M plano, paralelo a su dirección, que gira con él y recibe un haz de rayos incidentes que son reflejados por el espejo y van a parar a una escala graduada. Para obtener una imagen clara, colócase en M un espejito cóncavo (484) de un metro de radio de curvatura. A esta misma distancia se halla una ventanilla F solidaria de la escala y en la cual hay estirado un hilo opaco. La ventanilla está iluminada por una lámpara L . El espejo produce en la escala una imagen luminosa precisa, sobre la cual aparece la sombra de la imagen F' del hilo.

Cuando el eje da vueltas, los rayos incidentes permanecen fijos, los reflejados giran un ángulo doble del ángulo de rotación común del espejo y del eje; la luz se mueve en la escala y va a F'_1 . De este modo se ve la más ligera desviación del eje.

Sea (fig. 491, II) la proyección horizontal de la figura precedente. Hay que procurar siempre que, en la posición primitiva del eje, la imagen F' esté encima del hilo F ; entonces la proyección FM del rayo es perpendicular a la proyección M del espejo, y la proyección del rayo reflejado es MF' confundida con MF ; la escala es paralela al espejo. Cuando éste gira el ángulo θ , el rayo reflejado gira el ángulo 2θ y va a MF'_1 .

Se tiene
$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{F'F'_1}{MF'_1}.$$

Si el ángulo θ es débil, que es lo que ocurre en la práctica, se puede reemplazar $\text{tg } 2\theta$ por el ángulo 2θ y se tiene.

$$2\theta = \frac{F'F'_1}{MF'}, \quad \text{de donde} \quad \theta = \frac{F'F'_1}{2MF'}$$

Aplicación. — Supongamos que la mancha se haya movido medio milimetro ($FF'_1 = 0,05$) y que MF' sea igual a 1 metro o 100 cm. Se tendrá $\theta = \frac{0,05}{200} = \frac{1}{4000}$, lo cual es inferior a $1'$.

Este método debido a lord Kelvin es una modificación de otro de Poggendorff, que consiste en mirar con un antejo la imagen en el espejito movable de una escala graduada puesta al lado. Cuando el eje y el espejo giran, la imagen de la escala se desvia en el campo del antejo y las divisiones pasan sucesivamente delante de los hilos del retículo. En ambos casos, se hace el cálculo como anteriormente.

481. **Registro fotográfico de los pequeños movimientos de rotación.** — A veces, conviene registrar las indicaciones de ciertos aparatos, como electrómetros (946), declinómetros (707), etc.; y sería difícil establecer en el mecanismo movable de dichos aparatos estilos inscriptores. Pero, en este caso, se emplea el espejo cóncavo, que sirve comúnmente para medir las desviaciones. Para ello, proyéctase, mediante este espejo, una imagen real de una abertura vertical F , iluminada por una lámpara (fig. 492), sobre una abertura horizontal F' , practicada en la pared de una caja B que contiene una película fotográfica, en la cual los rayos producen un punto luminoso. La película se mueve verticalmente. Cuando el espejo sufre pequeñas rotaciones que alternan en sentidos contrarios,

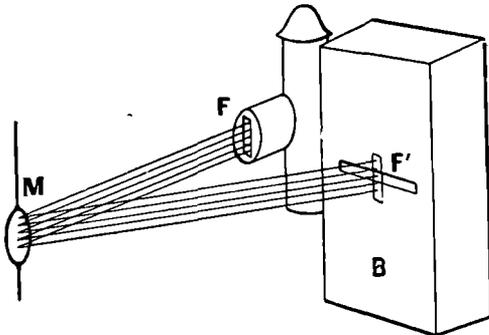


Fig. 492.

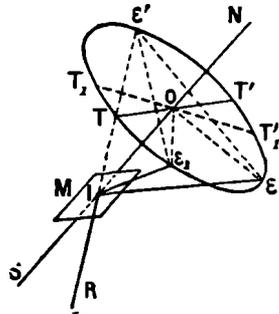


Fig. 493.

el punto luminoso describe en la película una línea, que se podrá estudiar fácilmente después de revelar la imagen fotográfica.

482. **Celóstato Lippmann.** — El celóstato inventado por M. Lippmann es un aparato a propósito para dar una imagen fija del cielo.

Supongamos un espejo plano M fijo en un eje NS que es paralelo a su plano y está orientado en la dirección del eje del mundo (fig. 493). Para un observador arrastrado por la Tierra, una estrella ϵ parece que describe en 24 horas y con movimiento uniforme una circunferencia, cuyo centro O se halla en NS y cuyo plano es perpendicular á esta recta. Sea TT' la intersección del plano del espejo con el del círculo O ; la imagen ϵ' de la estrella ϵ en el espejo es simétrica de ϵ respecto a TT' . Para que la imagen ϵ' haya quedado fija cuando la estrella haya venido á ϵ_1 , es preciso que el espejo haya girado de modo que su traza T_1, T'_1 sea perpendicular a ϵ_1, ϵ'_1 . En este caso, teniendo los ángulos $TOT_1, \epsilon\epsilon_1$, sus lados perpendiculares, son iguales. Por consiguiente, reemplazando los ángulos por su medida se tiene $\text{arco } TT_1 = \frac{1}{2} \text{ arco } \epsilon\epsilon_1$. Luego el ángulo $\epsilon O \epsilon_1$, que ha girado la estrella, medido por el arco, $\epsilon\epsilon_1$, es doble del ángulo TOT_1 , que ha girado el espejo. Se ve que si al espejo M , colocado en las condiciones indicadas, se le da un movimiento uni-

forme de rotación que se efectúe en 48 horas al rededor del eje del mundo, la imagen del cielo vista en ese espejo estará rigurosamente inmóvil. A los dos rayos incidentes ϵI , $\epsilon I'$, producidos por la misma estrella en dos posiciones sucesivas corresponderá un mismo rayo reflejo IK cuya prolongación pasa por ϵ' .

CAPÍTULO IV

ESPEJOS ESFÉRICOS

483. **Definiciones.** — Los espejos curvos más comúnmente usados son los *esféricos* y los *parabólicos*.

Espejos esféricos son aquellos cuya superficie es un *casquete* esférico. El espejo será *cóncavo* o *convexo*, según que la cara pulimentada sea interna o externa. El centro C de la esfera a que pertenece el espejo (fig. 494) es el *centro de curvatura*; el punto S , polo del casquete, es el *vértice*. La recta ilimitada SC , trazada por los puntos A y C , es el *eje principal del espejo*; toda recta que pase por el centro C , sin pasar por el punto A , es un *eje secundario*.

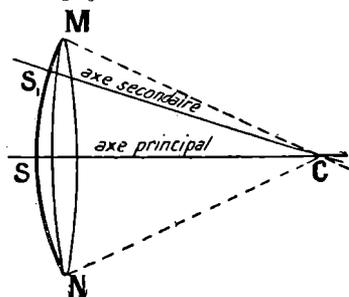


Fig. 494.

Denomínase *sección principal* del espejo a toda sección plana que pase por el eje principal, y *apertura* de un espejo al

ángulo en el centro MCN , comprendido entre una sección principal.

Las leyes de la reflexión se aplican fácilmente a los espejos curvos, considerando su superficie como formada por una infinidad de *elementos* planos. La *normal* a la superficie curva, en un punto dado, es perpendicular al elemento correspondiente, o al plano tangente que lo contiene: en un espejo esférico, es el radio geométrico de este punto.

484. **Espejos cóncavos. — Estudio geométrico y experimental (Caso de los rayos centrales).** — Este estudio se funda en la aplicación de las leyes de la reflexión a espejos de *pequeña apertura*, es decir, cuyo ángulo en el centro no pase de 8 a 9 grados, y que sólo admitan *rayos centrales*, es decir, rayos paralelos al eje principal o muy poco inclinados y muy próximos a este eje.

Todo rayo incidente que se encuentra en una sección principal, permanece allí después de la reflexión. Esto permite simplificar las construcciones relativas a la determinación de las imágenes, reduciéndolas en todos los casos a *construcciones planas*, hechas en el plano de la sección principal.

485. **Foco principal.** — Cuando un haz luminoso incide sobre un espejo cóncavo esférico paralelamente al eje principal, *todos los rayos van después de la reflexión a reunirse sensiblemente en un mismo punto F*

(fig. 496), situado a igual distancia del centro de curvatura y del espejo : este es el *foco principal*, siempre *real*.

En efecto, sea un haz de rayos paralelos al eje principal y SI uno de ellos (fig. 495). Este rayo se refleja siguiendo IF. Por consiguiente, en

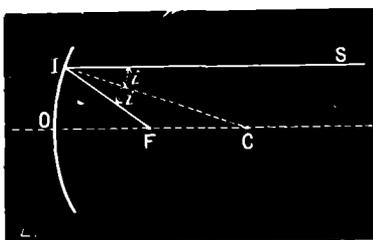


Fig. 495.

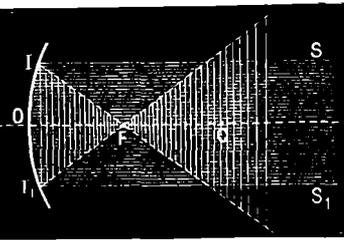


Fig. 496.

el triángulo IFC, los lados IF y CF son iguales como opuestos a ángulos iguales: pues los ángulos ICF y FIC son ambos iguales al ángulo SIC. Teniendo el espejo pequeña abertura, y estando cerca del eje el rayo SI, se puede admitir que *las rectas FI y FO son exactamente iguales, y que el punto F es el centro de OG*. El mismo razonamiento se aplica a cualquier otro rayo del haz.

La distancia FO es la *distancia focal principal*. Representémosla por f ; llamando R el radio de curvatura del espejo, se tiene $f = \frac{1}{2} R$.

Recíproca. — Si se supone en F un punto luminoso, los rayos emitidos por él toman, después de la reflexión, direcciones IS, I_1S_1 , paralelas al eje principal (fig. 496). En efecto, los ángulos de reflexión se convierten en ángulos de incidencia, e inversamente, pero estos ángulos permanecen siempre iguales.

486. Focos secundarios. — **Plano focal.** — **Imagen de un objeto alejado.** — Si el espejo recibe rayos SI, $S'I'$ (fig. 497) paralelos entre sí, pero no paralelos al eje principal, convergen, como puede probarse por una demostración análoga a la anterior, en un foco F' , colocado en el centro del radio CO' de la esfera que es paralelo a ellos. El conjunto de

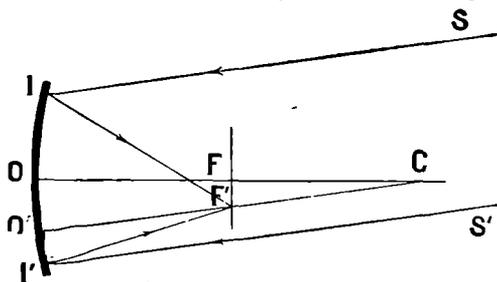


Fig. 497.

focos correspondientes a todas las direcciones posibles de los rayos paralelos es un casquete esférico de centro C y de radio $\frac{R}{2}$. Como sólo se consideran direcciones de radios poco inclinados sobre el eje, se puede reemplazar este casquete por su plano tangente en F, el cual es perpendicular al eje principal. Dicho plano se denomina *plano focal* del espejo.

Recíproca. — Si en F' existe un punto luminoso, los rayos que envía

al espejo producen, después de la reflexión, un haz $ISI'S'$ paralelo al eje secundario CF' .

Imagen de un objeto alejado. — Si un objeto se halla colocado a gran distancia de un espejo cóncavo, cada uno de sus puntos dirige al espejo un haz de rayos que pueden considerarse paralelos entre si; estos rayos convergen, pues, en un punto del plano focal. Por lo tanto, la imagen del objeto está entera en el plano focal.

Supongamos, por ejemplo, que el eje principal de un espejo cóncavo se vuelva hacia el borde inferior del disco solar. Ese punto emitirá rayos paralelos al eje, que, después de la reflexión, se reunirán en el foco principal F que, entonces, es una *imagen real* del borde inferior del sol.

Por otra parte, los rayos que salen del borde superior forman un haz paralelo $SIS'I'$; pero no paralelo al eje principal. Convergen, pues, en un punto F' del plano focal. Por consiguiente la imagen del sol es un disco que tiene por diámetro FF' , diámetro que es :

$$FF' = CF \operatorname{tg.} FCF' = f \operatorname{tg.} \alpha.$$

El ángulo $\alpha = FCF'$ es el diámetro aparente del sol, o sea, $32'$. También se puede decir que el diámetro de la imagen del sol es igual al arco de círculo comprendido entre el ángulo α , en la circunferencia de radio f ; porque, en un ángulo tan pequeño, la tangente trigonométrica puede confundirse con el arco.

487. Imágenes de un punto y de un objeto luminoso. — Estudio experimental y geométrico. — Caso de las imágenes reales. — Cuando un punto luminoso (fig. 498) está colocado a una distancia del espejo superior a su distancia focal, todos los rayos que de él emanan convergen, después de la reflexión, en un mismo punto A' , llamado *imagen real* del punto A .

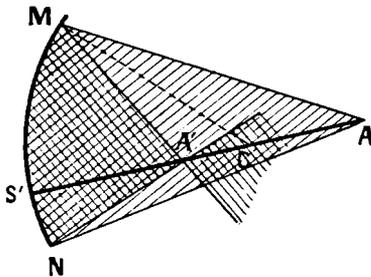


Fig. 498.

Esta propiedad puede demostrarse teóricamente (492). También se puede establecer experimentalmente. Para esto, colócase una bujía a una distancia del espejo superior a su distancia focal, y se mueve ante éste una pantalla blanca. Al llegar a una posición conveniente, dibújase en ella la imagen de la bujía (fig. 499)*. Cada punto de ésta tiene, pues, una imagen real, que es lo que queríamos demostrar.

Colocando el ojo en el haz de rayos reflejados, más allá de A' se puede también *ver* la imagen real A' que, en este caso, se denomina *imagen aérea*.

Colocando el ojo en el haz de rayos reflejados, más allá de A' se puede también *ver* la imagen real A' que, en este caso, se denomina *imagen aérea*.

Colocando el ojo en el haz de rayos reflejados, más allá de A' se puede también *ver* la imagen real A' que, en este caso, se denomina *imagen aérea*.

* En el caso que representa la figura, la imagen de la bujía está más distante del espejo que la misma bujía. Ya veremos que esto ocurre cuando la bujía se halla entre el centro y el plano focal. En caso de que aquella esté más lejos que el centro, la imagen se aproxima más al espejo. Para recoger la imagen real es preciso emplear una pantalla poqueña a fin de ocultar lo más posible los rayos incidentes.

Reciprocidad de la imagen y del objeto. — Si el punto luminoso está situado en A' , su imagen estará en A . En efecto, el rayo $A'M$, por ejemplo, se refleja según MA , en virtud de la igualdad de los ángulos de incidencia y de reflexión. Asimismo, los demás rayos que parten de A' se dirigen a A , después de la reflexión.

Luego si un punto luminoso se halla en uno de los puntos A o A' , su imagen está en el otro de estos dos puntos. Por esta razón dichos puntos A y A' se denominan *puntos (o focos) conjugados*.

La imagen de un punto luminoso se encuentra en el mismo eje que él.

En efecto, el rayo que sigue la dirección ACS' (fig. 498) cae normalmente en el espejo y se refleja según su propia dirección. Como la

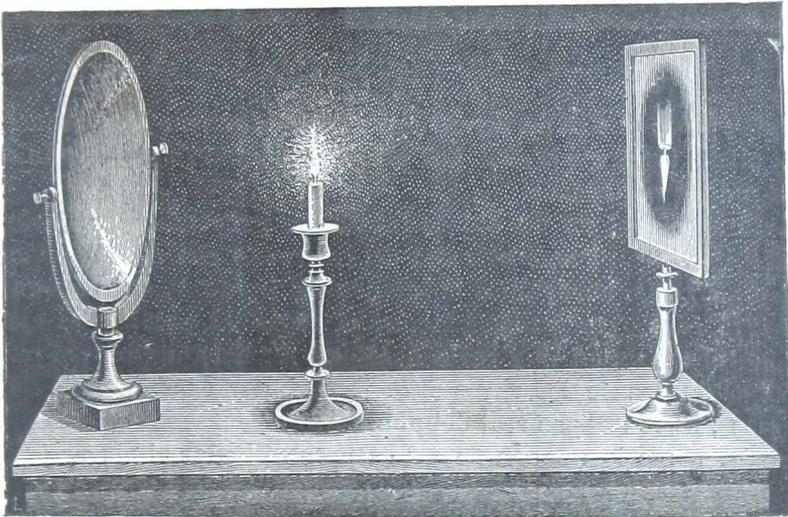


Fig. 499.

imagen A' está en el punto de encuentro de todos los rayos reflejados tiene que estar necesariamente en el rayo reflejado $S'C$.

OBSERVACIÓN. — Si el punto luminoso A se halla situado cerca del centro de curvatura, puede ocurrir que su eje secundario no corte al espejo. De todos modos, se puede demostrar que también en este caso está la imagen A' en el eje secundario de A . Además, en todos los casos, la experimentación confirma la proposición enunciada.

488. Planos conjugados. — *Si un punto luminoso se mueve en un plano perpendicular al eje principal, su imagen se mueve en otro plano perpendicular al eje principal.*

Estos dos planos se llaman *planos conjugados*, porque si se coloca un punto luminoso en uno de ellos, su imagen se reproduce en el otro.

Demostración. — Consideremos un pequeño casquete esférico MPN (fig. 500), de centro C . Sea P el punto de este casquete situado en el eje principal. Todos los puntos del casquete están a la misma distancia del espejo, distancia contada según el eje correspondiente. Las imágenes $M'N'$ de dichos puntos estarán a igual distancia del espejo. En efecto,

los diversos ejes tales como MS_1 , PS , NS_2 que se hallan dirigidos según los radios de la misma esfera desempeñan idéntico papel.

Por lo tanto, el casquete esférico MN tiene por imagen otro casquete esférico $M'N'$. Pero como no consideramos sino puntos próximos al eje, se puede confundir el casquete esférico MN con su plano tangente

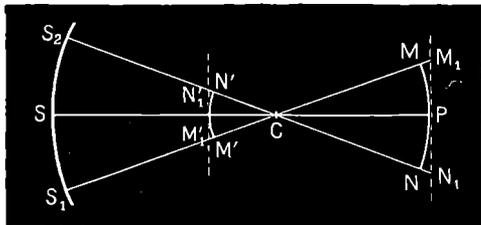


Fig. 500.

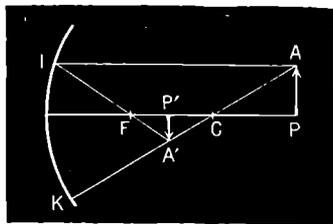


Fig. 501.

M_1N_1 en P , plano que es perpendicular al eje principal, y el casquete $M'N'$ con su plano tangente $M'_1N'_1$. Los planos M_1N_1 y $M'_1N'_1$, así definidos, se llaman *planos conjugados*.

489. **Imagen real de un objeto rectilíneo perpendicular al eje principal.** — 1º *Objeto situado más allá del centro.* — Sea AP el objeto luminoso (fig. 501). Construyamos la imagen del punto A , que está en el eje secundario ACK . Tracemos, además, el radio AI paralelo al eje principal; se refleja según IF y corta a AK en A' . Este punto es el punto de encuentro de dos de los rayos reflejados y, por consiguiente, de todos los demás: es la imagen real del punto A .

Además, como la imagen de AP es perpendicular al eje principal, es la recta $A'P'$ trazada por A' perpendicularmente a este eje.

Se ve que la imagen es invertida, más pequeña que el objeto y que está situada entre el plano focal y el centro.

OBSERVACIÓN. — Cuando el

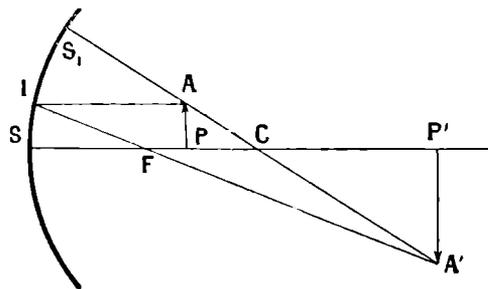


Fig. 502.

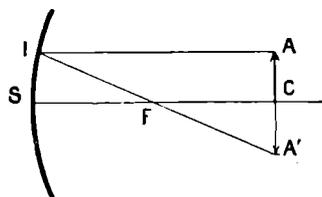


Fig. 503.

objeto está muy distante, la imagen es muy pequeña y se halla muy próxima al foco. Si el objeto se acerca, la imagen crece, alejándose del espejo.

2º *Objeto situado entre el centro y el plano focal.* — La construcción geométrica (fig. 502) demuestra que la imagen $A'P'$ está invertida, que es mayor que el objeto y se halla situada más allá del centro de curvatura.

3º *Objeto situado en el plano perpendicular al eje principal que pasa por el centro.* — La imagen se dirige según CA' (fig. 503) y es igual al objeto. En efecto, puede confundirse AI con CS y, en consecuencia, en

el triángulo $A'IA$, la recta CF , paralela a la base AI es igual a la mitad de esta base. Luego el punto C es igual a la distancia entre A' y A .

4º *Objeto situado en el plano focal.* — En este caso no se produce ninguna imagen. En efecto, el haz de rayos tales como AI y AK (fig. 504) procedentes del punto A , produce, después de la reflexión, un haz $KIGH$ paralelo al eje secundario CK ; y las imágenes de cada punto del objeto van a parar al infinito, cada una en la dirección de su eje secundario.

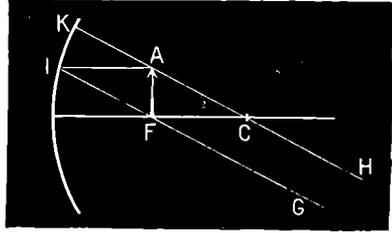


Fig. 504.

En resumen, cuando el objeto está primero a gran distancia del espejo y se acerca, luego, a éste, la imagen, muy pequeña al principio, y situada cerca del foco, aléjase, creciendo, de este punto, se hace igual al objeto, al pasar éste por el centro (en este caso se halla aquélla a la misma distancia) y después, se vuelve a alejar, aumentando, a medida que el objeto se acerca al plano focal. Cuando el objeto está en el plano focal, la imagen está en el infinito y es infinitamente grande.

Estudio experimental. — Estos resultados se comprueban fácilmente, moviendo una bujía delante de un espejo cóncavo y buscando, con una pantalla, en cada una de sus posiciones, la imagen de la bujía (fig. 499).

490. **Objetos situados más acá del plano focal. Imágenes virtuales.** — Si un punto luminoso A (fig. 505) está situado entre un espejo cóncavo y su plano focal, los experimentos demuestran que es imposible proyectar una imagen real de él en una pantalla. Pero, si se sitúa el ojo

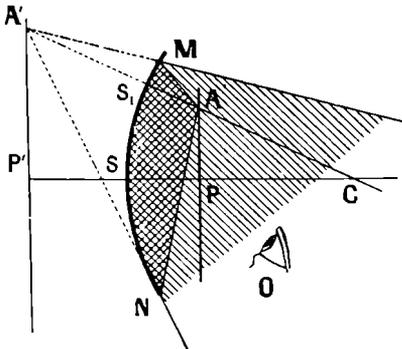


Fig. 505.

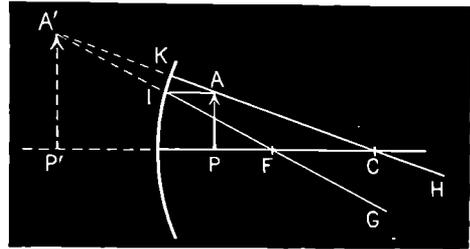


Fig. 506.

en el haz de rayos reflejados, se ve una imagen virtual A' del objeto. De donde se deduce que los rayos reflejados que proceden de rayos emanados de un punto A del objeto, son tales que sus prolongaciones concurren a un mismo punto A' , que es una *imagen virtual* del punto A .

Del mismo modo que para las imágenes reales, se demostraría : 1º que la imagen A' está en el eje del punto A ; 2º que las imágenes virtuales de los puntos de un plano AP perpendicular al eje principal están también en un plano $A'P'$ perpendicular a dicho eje principal.

Construcción de la imagen. — Sea AP el objeto (fig. 506). En primer

lugar, tracemos el eje secundario del punto A; luego, el rayo AI, paralelo al eje principal y que se refleja según IF. Este debe cortar al eje secundario *detrás* del espejo, en A' porque la figura IAFC es un trapecio en que AI es la base menor. Luego en A'P' tenemos una imagen de AP, *virtual y mayor que el objeto*.

La figura 507 representa la imagen virtual de una bujía.

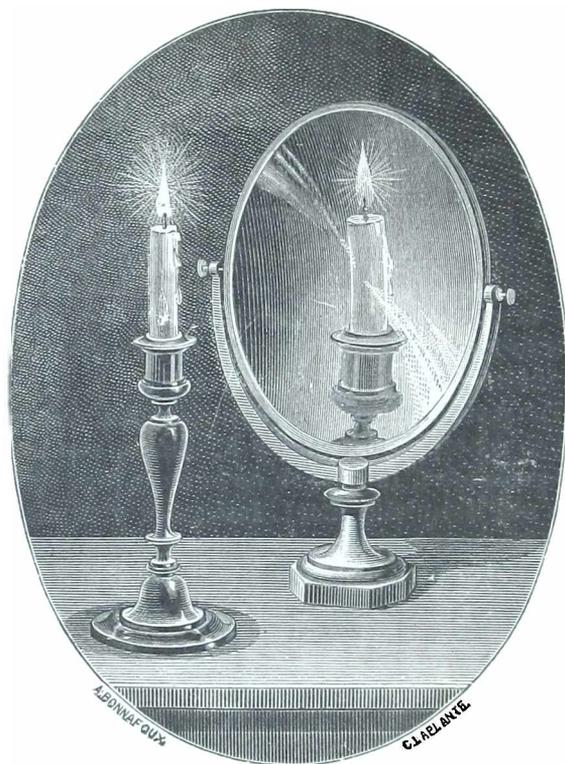


Fig. 507.

Si el objeto se halla muy cerca del plano focal, la imagen virtual está muy distante y es muy grande. Cuando el objeto se acerca al espejo, la imagen virtual se acerca también, disminuyendo de magnitud. Y, cuando el objeto se aplica contra el espejo, la imagen se aplica también y su tamaño es igual al del objeto.

OBSERVACIÓN. — Se ve que, cuando el objeto atraviesa el plano focal, la imagen, que antes era real, infinitamente grande, invertida y que estaba situada en el mismo lado que el objeto, con relación al espejo, pasa al infinito, al otro lado del espejo, volviéndose virtual y recta.

491. Determinación de la distancia focal de un espejo cóncavo. — *1º Procedimiento.* — Se vuelve hacia el sol el eje del espejo y se mueve ante éste una pequeña pantalla, hasta que la mancha luminosa que en ella se forma alcance su tamaño mínimo. Entonces, la pantalla se encuentra en el plano focal y su distancia al espejo es la distancia focal.

2º Procedimiento. — Se procura colocar un objeto en un plano perpendicular al eje principal, de manera que la imagen del objeto se produzca en el mismo plano. En este caso, el objeto está en el plano perpendicular al eje que pasa por el centro y su distancia al espejo es el duplo de la distancia focal de éste.

Para efectuar este experimento, puede tomarse una pantalla perforada por un orificio iluminado por un foco luminoso, y moverla delante del espejo, conservándola perpendicular al eje principal, hasta que la imagen del orificio se produzca claramente en la misma pantalla.

192. Teoría de los espejos cóncavos. — Caso de las imágenes reales. — Relación entre las distancias de la imagen y del objeto al espejo. — Sea P un punto luminoso y P' su imagen (fig. 508). Llamemos p y p' a las distancias SP y SP', del punto objeto y de su imagen al vértice S, y designemos por R el radio de curvatura del espejo.

Sea PI un rayo cualquiera procedente de P; IP' el rayo reflejado correspondiente; i , el valor común de los ángulos de incidencia y de reflexión; ω , α , α' , los ángulos ICS, IPS e IP'S. Tenemos :

$$\alpha = i + \omega \quad \text{y} \quad \omega = i + \alpha.$$

De donde $\alpha' - \omega = \omega - \alpha$. y, por consiguiente, $\alpha + \alpha' = 2\omega$.

Pero $\omega = \frac{\text{arco SI}}{R}$. Además, como suponemos que los ángulos, α y α' son muy pequeños, se puede confundir el arco SI con un arco descrito desde P como centro, con el radio PS, y con un arco descrito desde P' como centro, con el radio P'S, y, de este modo tendremos :

$$\alpha = \frac{Si}{p} \quad \text{y} \quad \alpha' = \frac{SI}{p'}.$$

Llevando estos valores a la ecuación precedente, resulta :

$$\frac{SI}{p} + \frac{SI}{p'} = \frac{2SI}{R}; \quad \text{o} \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{2}{R}.$$

Si designamos a $\frac{R}{2}$ por f tendremos la relación :

$$[1] \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f};$$

de donde

$$[2] \quad p' = \frac{pf}{p-f} \quad \text{o} \quad p' = \frac{f}{1-\frac{f}{p}}. \quad [2 \text{ bis}]$$

OBSERVACIÓN. — 1° El valor de p' sacado de esta fórmula no depende más que de p y de f , y es, pues, independientemente del ángulo α . De ahí, se deduce que todos los rayos que emanan de P se encuentran, después de la reflexión, en el mismo punto P'.

2° Se establece la misma fórmula suponiendo que P está comprendido entre el centro y el foco.

Discusión de la fórmula. — Hallemos los diferentes valores de p' según los que se dé a p .

A. $p = \infty$: el punto luminoso se halla colocado en el eje principal a distancia infinita.

De [2 bis] se saca $p' = f$: lo cual quiere decir que la imagen se forma en el foco principal. Y así debía suceder; puesto que, en tal caso, los rayos incidentes forman un haz paralelo al eje.

B. p disminuye : el punto luminoso se acerca al espejo.

En este caso, el denominador de la fórmula [2 bis] disminuye y el valor de p' aumenta : por consiguiente, la imagen se aproxima al centro, al mismo tiempo que el objeto. Además, queda comprendida entre el foco principal y el centro mientras el objeto esté comprendido entre el infinito y el centro.

C. $p = R = 2f$: el punto luminoso coincide con el centro.

La fórmula [2] nos da $p' = 2f$: la imagen coincide con el punto luminoso.

D. $p < 2f$: el punto luminoso está entre el centro y el foco principal.

La fórmula [2 bis] indica que $p' > 2f$, es decir, que la imagen se produce, en este caso, al otro lado del centro.

E. $p = f$: el punto está en el foco principal.

La fórmula [2] nos da $p' = \infty$: la imagen es enviada al infinito.

493. Magnitud de la imagen real. — Supongamos un objeto AP (fig. 509) de tamaño AP = o , colocado perpendicularmente al eje principal; y sea A'P' su imagen, cuyo tamaño designaremos por i . Consideremos el rayo AS; éste se refleja según SA'; puesto que debe ir a A'. Los ángulo ASP y A'SP' son

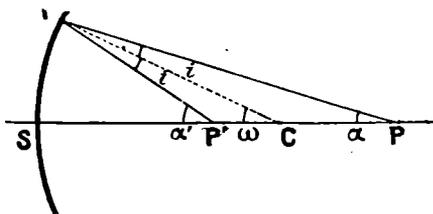


Fig. 508.

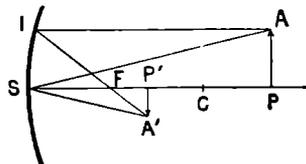


Fig. 509.

iguales por ser respectivamente el ángulo de incidencia y el de reflexión. Los triángulos $A'SP'$ y ASP son, pues, semejantes, y tenemos :

$$\frac{A'P'}{AP} = \frac{SP'}{SP} \quad \text{de donde} \quad \frac{i}{o} = \frac{p'}{p} \quad [3]$$

Y según la fórmula [2].

$$\frac{i}{o} = \frac{f}{p-f}$$

Discusión de la fórmula. — A. $p = \infty$. Tendremos $\frac{i}{o} = 0$, de donde $i = 0$: luego el tamaño de la imagen es nulo.

B. Si p disminuye, $\frac{i}{o}$ aumenta: la imagen aumenta. Mientras $p > 2f$, $\frac{i}{o} < 1$: la imagen es, pues, menor que el objeto.

C. $p = 2f$; se halla $\frac{i}{o} = 1$: la imagen es igual al objeto.

D. Si $p < 2f$, $\frac{i}{o} > 1$, la imagen es más grande que el objeto.

E. $p = f$. Resulta $\frac{i}{o} = \infty$: la imagen es infinitamente grande.

Todos estos resultados concuerdan con los hallados por experimentación y por construcción geométrica.

494. **Caso de las imágenes virtuales.** — **Relación entre las distancias del objeto y de la imagen al espejo.** — Sea P (fig. 510) un

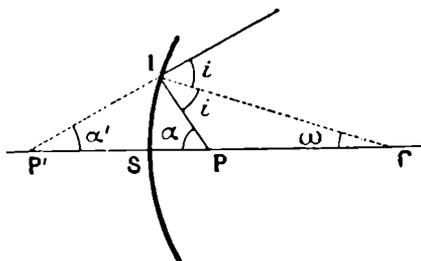


Fig. 510.

punto objeto colocado en el eje principal; PI, un rayo incidente; la prolongación del rayo reflejado correspondiente corta al eje principal en P' . Designemos por i el valor común de los ángulos de incidencia y de reflexión; por α , α' y ω , los ángulos IPS , $IP'S$ e ICS y por p y p' , las distancias SP y SP' .

Tendremos ;

$$\alpha = i + \omega \quad \text{e} \quad i = \omega + \alpha';$$

de donde

$$\alpha - \alpha' = 2\omega.$$

Considerando a IS como un arco de círculo descrito, ora de C , ora de P o bien de P' como centro, con CS , PS o $P'S$ como radio, se deduce

$$\frac{SI}{p} - \frac{SI}{p'} = \frac{2SI}{R}$$

de donde

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{2}{R} \quad \text{o} \quad \frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f} \quad [1]$$

Esta fórmula sólo se diferencia de la [1] relativa al caso de las imágenes reales, en que el término $\frac{1}{p'}$, que corresponde a la distancia de la imagen virtual, va precedido del signo —.

2º *Discusión de la fórmula.* — De la igualdad [1], se deduce :

$$[2'] \quad p' = \frac{pf}{f-p} \quad \text{o} \quad p' = \frac{f}{\frac{f}{p} - 1} \quad [2' \text{ bis}]$$

A. $p = f$. Resulta $p' = \infty$; la imagen está en el infinito y al otro lado del objeto, con relación al espejo.

B. p disminuye: p' disminuye, la imagen se acerca al espejo.

C. $p = 0$; $p' = 0$; la imagen se halla contra el espejo, al mismo tiempo que el objeto.

495. **Magnitud de la imagen virtual.** — Consideremos, como en el caso anterior, el rayo AS (fig. 511). Este se refleja de modo que su prolongación pase por la imagen virtual A' de A . El ángulo $A'SP'$, opuesto por el vértice al ángulo de reflexión, es igual al ángulo de incidencia ASP y los triángulos $A'SP'$ y ASP son semejantes. Luego :

$$\frac{A'P'}{AP} = \frac{SP'}{SP}; \quad \text{o} \quad \frac{i}{o} = \frac{p'}{p}, \quad \text{de donde} \quad \frac{i}{o} = \frac{f}{f-p}$$

Discusión. — A. $p = f$. Resulta $\frac{i}{o} = \infty$; la imagen es infinitamente grande.

B. p disminuye: $\frac{i}{o}$ disminuye, la imagen disminuye.

C. $p = 0$: $\frac{i}{o} = 1$, la imagen es igual al objeto.

496. **Fórmula de Newton.** — Sean ω y ω' las distancias FP y FP' de un punto objeto y de su imagen al foco F. En el caso de la imagen real (fig. 501) tenemos:

$$p = \omega + f, \quad p' = \omega' + f.$$

Y, en el caso de la imagen virtual (fig. 506),

$$p = f - \omega, \quad p' = \omega' - f.$$

Trasladando respectivamente estos valores a las ecuaciones [1] y [1'], tendremos, después de simplificar, en los dos casos:

$$\omega \omega' = f^2.$$

Esta fórmula se conoce con el nombre de *Fórmula de Newton*. Se la puede discutir, dando a ω todos los valores posibles, y deduciendo de éstos, los valores correspondientes de ω' , con lo cual se hallarán los resultados de la discusión anterior.

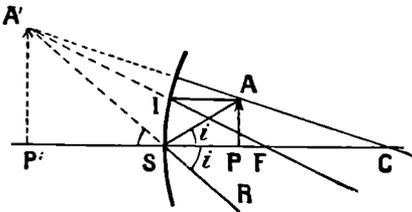


Fig. 511.

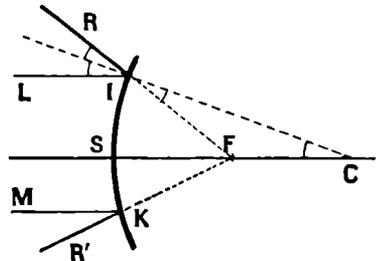


Fig. 512.

497. **Espejo convexos. — Estudio geométrico y experimental (caso de los rayos centrales).** — 1º *Foco principal. — Plano focal.* — Supongamos, primero, los rayos LI, MK..... (fig. 512), paralelos al eje principal. Después de su reflexión, toman direcciones divergentes IR, KR'..... prolongadas, concurren en un punto F, que es un *foco virtual*; es el *foco principal* del espejo. Considerando el triángulo isósceles CIF, se demostraría, como se ha hecho en los espejos cóncavos, que F es el centro de CS.

Del mismo modo, a cada dirección de rayos paralelos corresponde un foco virtual. Todos estos focos están situados en un plano perpendicular al eje principal y que pasa por F. Este plano es el *plano focal* del espejo.

2º *Imagen de un objeto.* — La experimentación demuestra que un espejo convexo no produce imagen real cuando el objeto es real; pero que da una imagen virtual; es decir, que todos los rayos que emanan de un punto y caen en el espejo, se reflejan de tal manera que sus prolongaciones encuentran el mismo punto que es la imagen virtual y que está situado en el mismo eje secundario que el punto objeto.

La imagen de un objeto plano AP (fig. 513) perpendicular al eje, es también perpendicular a este eje. Para construir la imagen de AP, basta obtener la imagen de A. Para esto, consideremos dos rayos que salgan de A: 1º el rayo AS que sigue al eje secundario y que, siendo normal

al espejo, se refleja según su propia dirección; 2º el rayo AI, paralelo al eje que se refleja de modo que su prolongación pase por F. Las prolongaciones de los dos rayos reflejados se encuentran en A', que es la imagen virtual de A. Luego la imagen de AP es A'P'.

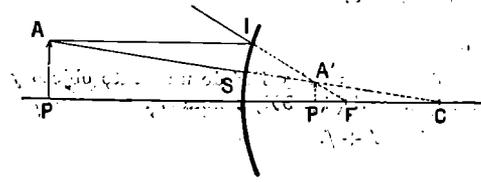


Fig. 513.

Sea cual fuere la posición de AP, la imagen es virtual. Si AP se halla muy lejos, ésta estará muy próxima al foco y

será muy pequeña. Si AP se acerca hasta el mismo espejo, A'P' se aproximará también, al mismo tiempo, y creciendo, hasta el espejo. Finalmente, A'P' se hace igual al objeto, cuando éste se aplica contra el espejo.

OBSERVACIÓN. — Imágenes reales. — Para obtener una imagen real, sería necesario hacer caer en el espejo un haz de rayos luminosos dirigidos hacia los distintos puntos de A'P', lo cual es fácil efectuar mediante un espejo cóncavo, por ejemplo; pues, entonces, serían realmente enviados a los diversos puntos de AP.

498. Teoría de los espejos convexos. — Tomando las mismas letras que para los espejos cóncavos, y razonando de igual manera, se demuestran las dos fórmulas :

$$[1] \quad \frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f} \quad \text{y} \quad \frac{i}{o} = \frac{p'}{p}. \quad [2]$$

De estas fórmulas, se deducen :

$$p' = \frac{pf}{f+p} \quad \text{y} \quad \frac{i}{o} = \frac{f}{f+p}.$$

Por medio de estas fórmulas, y dando a p todos los valores posibles desde ∞ hasta 0, se hallarán todos los resultados que nos ha enseñado el estudio geométrico.

499. Medida de la distancia focal de un espejo convexo*. — Para medir la distancia focal de un espejo convexo se puede emplear el procedimiento siguiente. Con un espejo cóncavo o una lente convergente, se forma una imagen real A'P' (fig. 513). Se marca su posición y se interpone el espejo de manera que A'P' se halle entre su vértice S y su foco F. Se obtiene una imagen real AP, y se miden las distancias $SP = p$, $SP' = p'$. Así, tendremos :

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}, \quad \text{de donde} \quad f = \frac{pp'}{p-p'}.$$

500. Fórmulas generales de los espejos esféricos. — Si llamamos, de un modo general, p a la distancia de un objeto al vértice de un espejo esférico cóncavo o convexo; p' , a la distancia de la imagen real o virtual, al mismo vértice, demostraremos, examinando todos los casos posibles, que para hallar la relación que existe entre p y p' , basta transformar la fórmula

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

anteponiendo el signo $-$ a todo término correspondiente a un punto virtual. Y, en los espejos convexos, en particular, se debe colocar $-\frac{1}{f}$ en el segundo miembro.

Si o representa la magnitud del objeto e i , la de la imagen tendremos, en todos los casos :

$$\frac{i}{o} = \frac{p'}{p}.$$

* Nos limitaremos a indicar el principio de esta medida, sin describir los aparatos que permiten realizarla.

501. Espejos de gran abertura. — **Aberración de esfericidad; cáustica por reflexión.** — Cuando la abertura del espejo excede de 8 o 9 grados, los rayos emanados de un punto objeto P y reflejados junto a los bordes, cortan al eje en un punto P'' más próximo al espejo que la imagen P' dada por los rayos centrales (fig. 514, I). La distancia P''P' se llama *aberración longitudinal* de esfericidad.

Cuando se trata de un punto luminoso situado en el eje principal y al infinito, la aberración correspondiente FF' (fig. 514, II) se llama *aberración longitudinal principal*. Y si

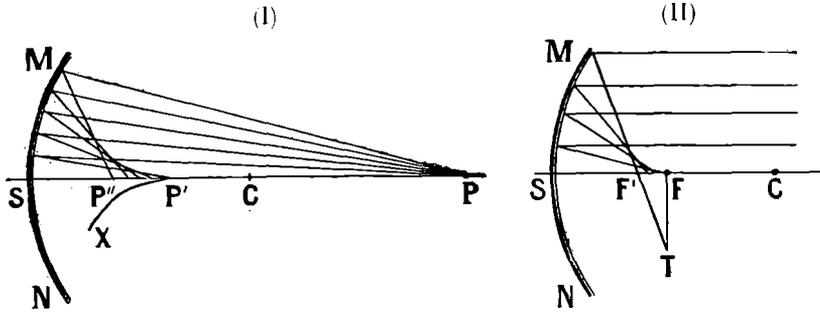


Fig. 514.

se coloca una pantalla en el plano focal, se obtendrá, en vez de un punto luminoso, un círculo luminoso cuyo rayo FT se denomina *aberración transversal principal*. De ahí resulta, en los espejos cóncavos esféricos de gran abertura, un defecto de limpidez, que es motivo de reemplazarlos por espejos cóncavos *parabólicos* (502) en la construcción de aparatos de óptica.

Como los rayos reflejados se cortan sucesivamente de dos en dos (fig. 514) sus puntos de intersección producen en el espacio una superficie brillante a la que se da el nombre de *cáustica por reflexión*. La curva P'X representa una de las ramas de la sección principal de esta superficie, que es de *revolución* alrededor del eje principal.

502. **Espejos aplanéticos.** — *Espejos parabólicos.* — Los espejos parabólicos son espejos cóncavos cuya superficie está engendrada por la revolución de un arco de parábola AM alrededor de su eje AX (fig. 515).

Sabemos que en un punto cualquiera M de la parábola el rayo vector FM y la recta ML paralela al eje forman ángulos iguales con la tangente TT'. Por consiguiente, también serán iguales los ángulos con la normal: luego, en esta clase de espejos, todo rayo tal como LM, paralelo al eje, será reflejado según MF y pasará exactamente

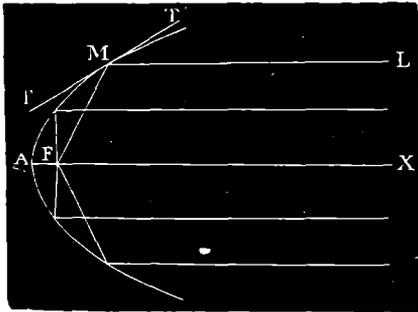


Fig. 515.

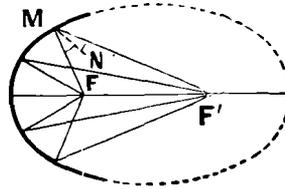


Fig. 516.

por el foco geométrico F del espejo. *Recíprocamente*, si se coloca una fuente de luz en este foco, los rayos luminosos que caen en el espejo se reflejan en un haz exactamente paralelo al eje.

Espejos elípticos. — Asimismo, si se considera un espejo cóncavo (fig. 516) cuya superficie forme parte de la superficie de un elipsoide de revolución alrededor de su eje mayor, todo rayo procedente de uno de los focos F, va, después de la reflexión, a F', en virtud de la propiedad conocida que tiene la normal a la elipse en un punto, de ser bisectriz de los radios vectores.

Aplanatismo. — Se dice que un espejo es aplanético, cuando los rayos procedentes del punto objeto después de la reflexión, pasan, real o virtualmente, por un mismo punto imagen.

Sólo los espejos planos son aplanéticos para cualquiera posición de un punto luminoso.

Los espejos parabólicos son aplanéticos cuando el punto luminoso se encuentra en el foco o en el infinito, en el eje.

Los espejos elípticos son aplanéticos si el punto luminoso está en uno de los focos. Finalmente los espejos esféricos son aplanéticos cuando el punto luminoso se halla en el centro. En cualquier otra posición del punto luminoso, el aplanetismo no es más que aproximado.

Aplicaciones de los espejos parabólicos. — 1ª Los espejos parabólicos se emplean como proyectores. Si se coloca una fuente luminosa en el foco de un espejo parabólico, la luz reflejada conserva la misma intensidad hasta a gran distancia de la fuente.

2ª Los espejos parabólicos rempazan a los espejos esféricos como *objetivos de telescopios* (599).

Actualmente, constrúyese, para este uso, espejos de cristal plateado que son al mismo tiempo menos pesados que los antiguos espejos de bronce, menos costosos, más fáciles de reparar y susceptibles de mejor pulimento. Primero, se fabrican esféricos; luego se los vuelve aplanéticos, trabajando sus diversas regiones por el método llamado de *retoques locales*, debido a Foucault.

CAPÍTULO V

REFRACCIÓN DE LA LUZ. — PRISMA

LEYES DE LA REFRACCIÓN SIMPLE

503. Definiciones. — Si por un agujero practicado en la contraventana de un cuarto oscuro, se hace penetrar un haz SI de luz solar (fig. 517)

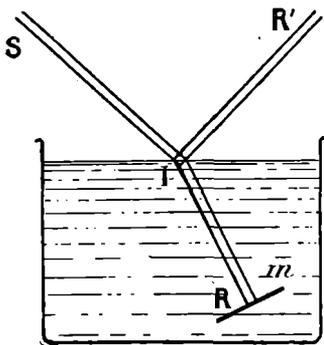


Fig. 517.

y que caiga oblicuamente en una masa de agua, se verá que una parte IR' se refleja y la otra penetra en el agua, pero se desvia* según IR. Este fenómeno se denomina *refracción de la luz*. Se produce siempre que los rayos luminosos atraviesan *oblicuamente* la superficie de separación de dos medios transparentes. Entonces, cada rayo incidente da lugar a un rayo refractado**.

Se denominan *ángulo de incidencia i* y *ángulo de refracción r* los ángulos SIN, RIN (fig. 518) que forman respectivamente con la normal el rayo incidente y el refractado.

Estos dos rayos están siempre a *un lado y a otro de la normal*.

* Con la luz blanca del sol, el fenómeno se complica con la dispersión (610). Para observar el fenómeno simple de la refracción, se hace atravesar a los rayos solares un cristal rojo.

** En ciertos cuerpos cristalizados, como el espato de Islandia el rayo incidente engendra *dos rayos refractados*. Este es el fenómeno de la *refracción doble* (677); el fenómeno ordinario se denomina *refracción simple*.

En el caso de que la luz pase del aire al agua, el rayo refractado está más cerca de la normal que el rayo incidente; el ángulo de incidencia es mayor que el de refracción: entonces se dice que *el agua es más refringente que el aire*. Asimismo, *el vidrio es más refringente que el aire*, porque, al pasar del aire al vidrio, el rayo se acerca a la normal.

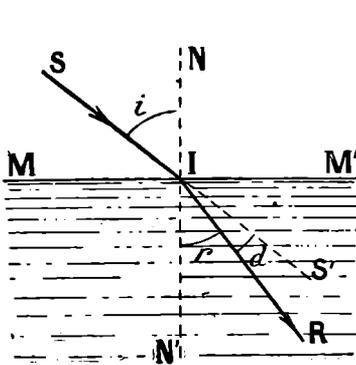


Fig. 518.

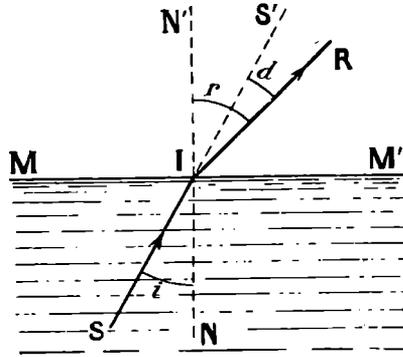


Fig. 519.

Por lo contrario, si un rayo pasa del agua al aire (fig. 519), o del vidrio al aire, o, en general, de un medio a otro menos refringente, se aleja de la normal y el ángulo de incidencia es menor que el de refracción.

504. **Leyes de la refracción simple.** — La refracción simple se verifica con arreglo a las siguientes leyes:

1ª *El rayo incidente y el refractado están en un mismo plano perpendicular a la superficie refringente (este plano, que contiene el rayo incidente y la normal, es el plano de incidencia).*

2ª (Ley de Descartes.) *Sea cual fuere la oblicuidad del rayo incidente, el seno del ángulo de incidencia y el del ángulo de refracción están en relación constante.*

Se puede tratar de sentar estas leyes por experimentos directos; pero estos experimentos son siempre poco exactos. La precisión de las leyes queda más afirmada por la comprobación de las consecuencias que de ellas se deducen.

Estudio experimental directo. — Entre los procedimientos empleados, citaremos el siguiente:

Colócase en una mesa una especie de escuadra BAI (fig. 520) formada por una lámina metálica delgada y estrecha. En la sección horizontal AB, hay una escala graduada en milímetros. Se ilumina la escuadra por una fuente luminosa S de pequeñas dimensiones y lo bastante distante para que proyecte desde AI una sombra sin penumbra. Se vuelve la escuadra de modo que la sombra de AI coincida con la escala horizontal; la escuadra y la fuente luminosa están, entonces, en un mismo plano vertical. Se nota la longitud AB de la sombra.

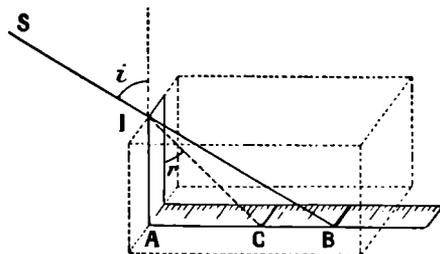


Fig. 520.

Colócase en AB un paralelepípedo de cristal, cuya altura sea exactamente igual a AI

y de modo que AI quede aplicado contra una cara vertical del paralelepípedo. Entonces se observa que la sombra es más corta, lo cual prueba la refracción de la luz; pero, que queda por completo en AB, lo que demuestra la primera ley.

Mídese la nueva longitud AC de la sombra. Y se mide previamente la altura AI del paralelepípedo.

En este experimento, el rayo incidente SI se refracta según IC. En el triángulo BIA, el ángulo BIA es igual al ángulo de incidencia i , y, en el triángulo IAC el ángulo CIA es igual al de refracción r ; luego

$$\text{sen. } i = \frac{BA}{BI} = \frac{BA}{\sqrt{AB^2 + AI^2}}, \quad \text{y} \quad \text{sen. } r = \frac{CA}{CI} = \frac{CA}{\sqrt{CA^2 + AI^2}}.$$

Estas fórmulas permiten calcular $\text{sen. } i$ y $\text{sen. } r$. Establécese la relación $\frac{\text{sen. } i}{\text{sen. } r}$.

Se vuelve a empezar el experimento, acercando más o menos la escuadra a la fuente S o inversamente, de manera que se haga variar el ángulo de incidencia. En cada experimento, calculase la relación $\frac{\text{sen. } i}{\text{sen. } r}$. Y se observa que los diversos valores de este cociente no difieren entre sí más que cantidades que pueden atribuirse a errores de experimentación.

505. Índice de refracción. — La relación constante $\frac{\text{sen. } i}{\text{sen. } r} = n$, definida por ley de Descartes, se llama *índice de refracción* del segundo medio con relación al primero.

El índice varía con los medios: el del agua con relación al aire es 1,33 (o $\frac{4}{3}$): el del vidrio ordinario 1,5 próximamente (o $\frac{3}{2}$).

En general, si un rayo pasa de un medio a otro más refringente, r es inferior a i y se tiene $n > 1$

Por lo contrario, si el rayo pasa de un medio a otro menos refringente $i < r$ y $n < 1$.

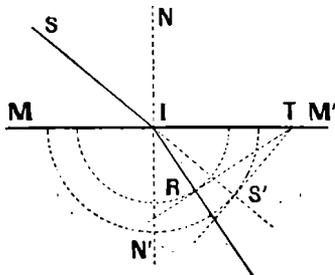


Fig. 521.

506. Construcción del rayo refractado: regla de Huyghens. — Una construcción geométrica, llamada *regla de Huyghens*, permite obtener gráficamente el rayo refractado.

Sea MM' la superficie refringente, SI el rayo incidente, NIN' la normal (fig. 521). Desde el punto I como centro, tracemos dos circunferencias concéntricas, una de radio igual a la unidad, la otra a n . Prolonguemos el rayo incidente hasta encontrarse en S' con la circunferencia de radio n y tracemos en S' la tangente a la circunferencia. Esta tangente corta a MM' en T. Desde el punto T tracemos una tangente TR a la circunferencia de radio 1. Finalmente, unamos el punto I con el de contacto R: la recta IR es el rayo refractado que corresponde al rayo incidente SI.

En efecto, en el triángulo ITR que es rectángulo en R, el ángulo agudo en T es igual al de refracción RIN' y se tiene la igualdad

$$RI \text{ (o } 1) = IT \text{ sen. } RIN'.$$

En el triángulo $IS'T$, que es rectángulo en S' , el ángulo agudo en T es igual al de $S'IN'$ o de i , y se tiene la igualdad

$$IS' \text{ (o } n) = IT \text{ sen. } i,$$

de donde se deduce

$$\frac{\text{sen. } i}{\text{sen. } RIN'} = n$$

cuyo ángulo RIN' es igual al ángulo de refracción e IR es el rayo refractado.

507. Desviación por refracción. — Llámase *desviación* del rayo luminoso por la refrac-

ción al ángulo $S'IR = d$ (fig. 518) que forma la prolongación del rayo incidente con el rayo refractado. Si n es mayor que 1, se tiene $d = i - r$. Cuando i crece r crece también; pero no tan rápidamente: por consiguiente d crece.

Cuando n es < 1 , $d = r - i$ (fig. 519): cuando i crece, r crece también, pero menos rápidamente y d crece. Luego la desviación crece en todos los casos con el ángulo de incidencia.

508. Regreso inverso de la luz. — Índice inverso. — Si con un espejo plano m se envía la luz al segundo medio, según RI (fig. 517), el experimento demuestra que seguirá, en el primer medio, la dirección IS del rayo incidente anterior.

Según esto, cuando la luz pase del segundo medio al primero, el ángulo de incidencia será r y el de refracción será i . El índice del primer medio respecto del segundo es pues.

$$n' = \frac{\text{sen. } r}{\text{sen. } i} = \frac{1}{n}.$$

509. Lámina de caras paralelas. — La refracción de la luz a través de una lámina transparente de caras paralelas permite establecer el principio del regreso inverso de la luz, por la comprobación exacta de una de sus consecuencias directas.

Cuando la luz atraviesa una lámina de caras planas y paralelas, los rayos emergentes son paralelos a los rayos incidentes.

Demostración. — Sean un espejo de caras paralelas (fig. 522), que está representado en la figura por una sección perpendicular a sus caras, SA un rayo incidente, DB el emergente, i y r los ángulos de incidencia y de refracción a la entrada del rayo, y por fin r' e i' los mismos ángulos a su salida.

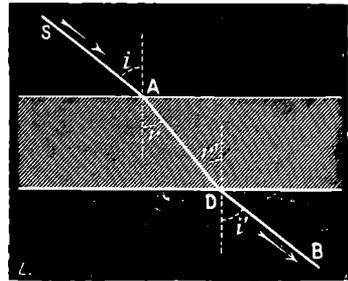


Fig. 522.

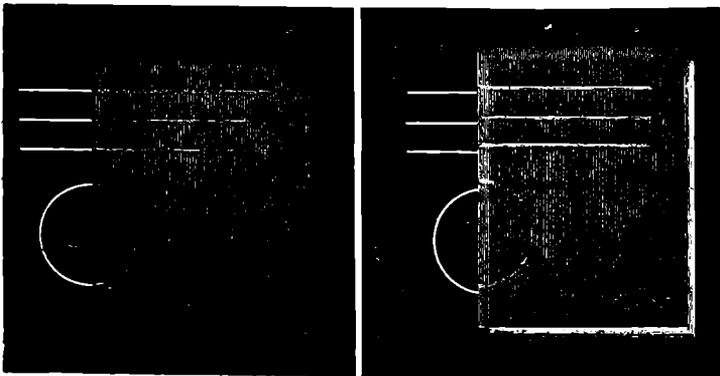


Fig. 523.

Pero como las dos normales en A y B son paralelas, los ángulos r' y r son iguales por alternos-internos; por consiguiente, en virtud del

regreso inverso de la luz, los ángulos i' e i son iguales, y DB es paralelo a SA.

Si el rayo luminoso incide normalmente a una cara, sale de la lámina en la prolongación misma de su dirección de incidencia. Si cae oblicuamente, sufre al atravesar la lámina, no una desviación sino un movimiento lateral que sería fácil calcular, y que es más o menos grande, según el ángulo de incidencia y el grueso de la lámina.

Comprobación. — 1º Colocando una lámina de vidrio encima de una hoja de papel donde se han trazado líneas rectas o curvas (fig. 523), y mirando oblicuamente a través de ella, se observa en las líneas una solución de continuidad que no se nota mirando normalmente.

2º También se puede comprobar el fenómeno de una manera muy exacta sirviéndose de un anteojo astronómico (586).

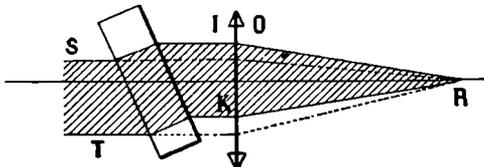


Fig. 524.

Se mira a una estrella con el anteojo de modo que la imagen de aquella se produzca en el punto de intersección de los hilos del retículo. El haz paralelo que la estrella envía al objetivo, después de refractarse en éste va al punto R (fig. 524) de intersección del retículo. Si se interpone una lámina de caras paralelas ante el objetivo y oblicuamente con relación

a los rayos luminosos, se observa que la imagen de la estrella no ha abandonado el punto de intersección de los hilos del retículo. De donde se deduce que a su salida de la lámina, los rayos eran todavía paralelos a su primera dirección, porque de lo contrario, el objetivo los hubiera hecho converger en un punto distinto de R.

510. Índice absoluto. — Índice relativo. — Se llama índice absoluto de una sustancia al índice de refracción de esta sustancia con relación al vacío.

Pero el índice con relación al vacío se diferencia muy poco del índice con relación al aire. En efecto, se puede demostrar que el índice de una sustancia con relación al vacío es igual a su índice con relación al aire multiplicado por el índice del aire con relación al vacío. Y el índice del aire con relación al vacío difiere muy poco de la unidad (es igual a 1,000129.)

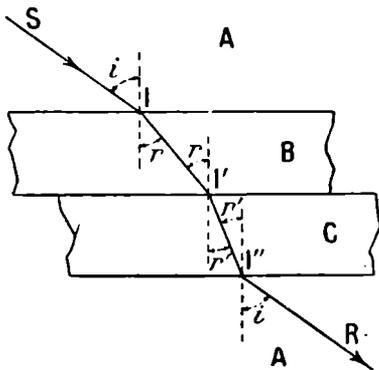


Fig. 525.

Demostración. — Índice relativo. — Si un rayo SI (fig. 525) atraviesa una lámina mixta de caras paralelas, compuesta de dos láminas B y C superpuestas, formadas por sustancias que tengan índices diferentes y cuyas dos caras extre-

mas estén bañadas en el mismo medio, por ejemplo, en el aire, la experimentación demuestra que el rayo emergente es paralelo al rayo incidente.

Sean n y n' los índices de dos medios con relación al aire, y ν el índice desconocido del segundo medio respecto del primero; tendremos :

$$\text{sen. } i = n \text{ sen. } r; \quad \text{sen. } r = \nu \text{ sen. } r'; \quad \text{sen. } r' = \frac{1}{n'} \text{ sen. } i$$

Multiplicando miembro a miembro estas tres ecuaciones, resulta :

$$\frac{n_2}{n_1} = 1, \quad \text{de donde} \quad v = \frac{n'}{n}.$$

El índice relativo del medio C con relación al medio B es pues la razón $\frac{n'}{n}$ de los índices de ambos medios con relación a un tercero, el aire.

Si la lámina estuviese en el vacío, n' y n serían los índices absolutos de las dos sustancias. Del mismo modo, si N es el índice absoluto de una sustancia, n , su índice con relación al aire, y n_a e. índice del aire, tendremos :

$$n = \frac{N}{a}, \quad \text{de donde} \quad N = n \times n_a.$$

Consecuencias. — 1º Cuando un rayo pasa de un cuerpo a otro cuyo índice es mayor, se acerca a la normal. — En efecto, el índice relativo $\frac{n'}{n}$ es, entonces, > 1 ; puesto que $n' > n$. Esto es lo que ocurre cuando, por ejemplo, un rayo pasa del agua al cristal.

Inversamente, cuando un rayo pasa de un cuerpo a otro cuyo índice es menor, se aleja de la normal. — En efecto, el índice relativo $\frac{n'}{n}$ es, en este caso, inferior a 1.

2º Si un rayo SI (fig. 526) atraviesa una sucesión de medios cuyos índices van creciendo, describe una línea quebrada que continúa acercándose a la normal.

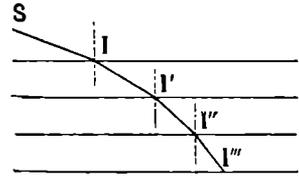


Fig. 526.

3º Finalmente, si un rayo atraviesa un medio cuya refringencia varía de modo continuo, describe una línea curva. Dicho medio se realiza colocando en un cubo agua salada, y, encima, agua pura. Poco a poco, ambos líquidos se difunden uno en otro y el índice varía gradualmente de arriba abajo. Si, entonces, se envía oblicuamente un rayo luminoso al cubo, sigue una dirección curvilínea.

511. **Refracción atmosférica.** — Un efecto de refracción es también lo que hace ver los astros más altos sobre el horizonte de lo que realmente están. En efecto, las capas de la atmósfera aumentan en densidad al acercarse al suelo; pero como dado un mismo gas el índice de refracción aumenta con la densidad, resulta que al penetrar en el aire los rayos del sol y al propagarse en él, se doblan (fig. 527), describiendo una curva que llega hasta la vista en A; de modo que vemos al astro en S' y no en S siguiendo la tangente a dicha curva.

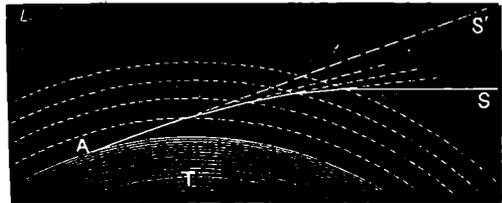


Fig. 527.

El efecto es tanto más pronunciado, cuanto más cerca del horizonte está el astro. En la Europa central, la refracción atmosférica eleva los astros algo más de medio grado (unos 34'). Como el Sol y la Luna tienen diámetros aparentes inferiores a 34', sus discos aparecen enteros — en el mar donde nada los oculta — aun antes de que su parte superior haya salido por encima del horizonte. Del mismo modo, al ponerse, permanecen aún visibles estando ya debajo del horizonte. De modo que el día se encuentra anticipado al amanecer, y prolongado al caer la tarde, por causa de la refracción atmosférica.

512. **Variación del ángulo de refracción en función del ángulo de incidencia.** — Paso de la luz de un medio a otro más refringente. — Si se varia el ángulo de incidencia i de un rayo que pasa de un medio a otro más refringente (por ejemplo, del aire al agua o al cristal), desde cero (*incidencia normal*) hasta 90° (*incidencia rasante*), el ángulo de refracción aumenta a partir de cero: pero permanece siempre menor que el ángulo de incidencia. La figura 528 representa los rayos refractados IN' , IR_1 , IR_2 , IR que corresponden a los rayos incidentes NI , S_1I , S_2I , SI . En la incidencia rasante, el ángulo de refracción tiene un valor l tal que

$$\frac{\text{sen. } 90^\circ}{\text{sen. } l} = n; \quad \text{de donde} \quad \text{sen. } l = \frac{1}{n}.$$

Este ángulo l se llama *ángulo de refracción límite*.

Se ve que, si se consideran todos los rayos que inciden en I , en la superficie de separación, los rayos refractados correspondientes están

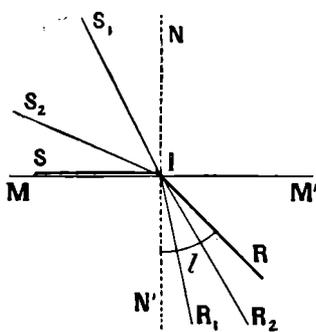


Fig. 528.

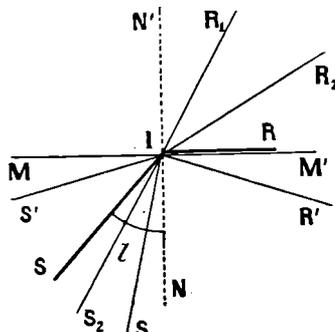


Fig. 529.

comprendidos en un cono de vértice I , de eje IN' y de un semiángulo en el vértice igual a l .

513. **Paso de la luz de un medio a otro menos refringente.** — **Ángulo límite, reflexión total.** — Si un rayo luminoso pasa de un medio a otro menos refringente, el ángulo de refracción es mayor que el ángulo de incidencia. De ahí se deduce que siempre existe un valor SIN (fig. 529) del ángulo de incidencia para el cual el ángulo de refracción RIN' es igual a un recto; entonces, el rayo refractado IR sale *rasante*.

Este ángulo SIN es el *ángulo de incidencia límite*. Si los dos medios son los mismos que en el caso precedente, el ángulo límite tiene el mismo valor en razón del regreso inverso de la luz.

Siempre que el ángulo de incidencia SIN sea mayor que el ángulo límite, el rayo incidente no puede dar lugar a ningún rayo refractado. El experimento demuestra que en este caso hay *reflexión interior* según IR' ; y se la denomina *reflexión total*, porque la luz incidente se refleja *en totalidad*; mientras que, con una incidencia más pequeña, sólo se reflejaría parcialmente.

Del agua al aire, el ángulo límite es $48^{\circ},30'$; del cristal al aire es $41^{\circ},38'$.

OBSERVACIÓN. — Si se supone un punto luminoso O situado en un medio más refringente que el aire (fig. 530), el cono de rayos luminosos que tiene por ángulo en el vértice el doble del ángulo límite, divide al espacio en dos regiones: 1^o en lo interior del cono todos los rayos que inciden sobre la superficie de separación emergen en el aire, porque forman un ángulo de incidencia interno menor que el ángulo límite: 2^o en lo exterior del cono, todos los rayos incidentes experimentan la reflexión total.

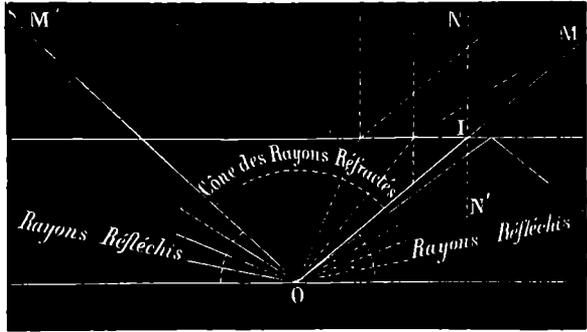


Fig. 530.

Y si se oculta la parte de la superficie contenida en el cono, no podrá salir ningún rayo.

Experimento. — Este último punto se comprueba tomando un disco de corcho, al que se fija una varilla NO (fig. 531). Se le deja flotar en la superficie de un cubo de agua, dirigiendo

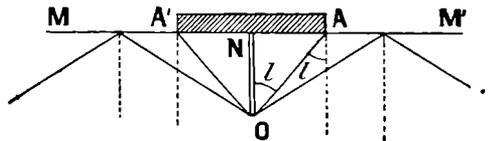


Fig. 531.

la varilla NO hacia abajo. Si el ángulo NOA es igual al ángulo límite o mayor que este ángulo, es imposible ver la varilla NO , sea cual fuere la posición en que se coloque el ojo encima del agua.

514. **Visión a través de una superficie plana refringente.** — Supongamos un punto A (fig.

532), colocado en un medio que suponemos más refringente que el aire ambiente*, en el agua, por ejemplo. Los rayos tales como AI y AI' se refractan según IR y $I'R'$. Si sólo se consideran rayos poco apartados de la normal AN se puede demostrar que

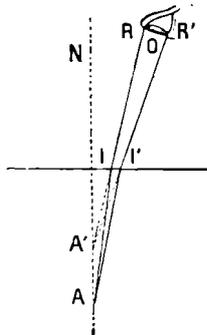


Fig. 532.

las prolongaciones de los rayos refractados se encuentran en un mismo punto A' de la normal.

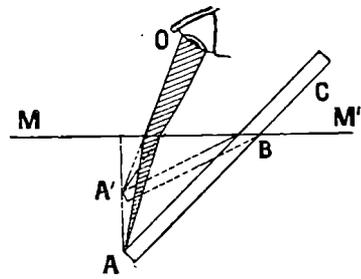


Fig. 533.

*. Con la misma facilidad se trataría el caso de un medio menos refringente que el aire.

El ojo O que recibe estos rayos cree, pues, ver el punto luminoso en A', en una posición más próxima que A de la superficie libre.

Consecuencias. — En virtud de este fenómeno, el fondo de un vaso lleno de agua, o bien el cauce de un río nos parecen más o menos elevados. Por la misma razón, un palo, sumergido oblicuamente en el agua, parece quebrado. En efecto, sus puntos, que se hallan comprendidos entre A y B (fig. 533) parecen estar entre A' y B, es decir, más elevados.

Demostración. — Sean AI (fig. 534) uno de los rayos incidentes e IR el rayo refractado correspondiente; su prolongación cortará a la normal AN en un punto A'.

Tenemos;

$$OA' = \frac{OI}{\operatorname{tg}. r}, \quad \text{con} \quad OI = OA \operatorname{tg}. i; \quad \text{de donde} \quad OA' = OA \frac{\operatorname{tg}. i}{\operatorname{tg}. r}.$$

Pero, si el rayo AI está muy próximo a la normal, los ángulos i y r son muy pequeños, y sus tangentes pueden confundirse con sus senos. Si se llama n al índice del segundo medio con relación al primero, tendremos :

$$[1] \quad n = \frac{\operatorname{tg}. i}{\operatorname{tg}. r}; \quad \text{de donde} \quad OA' = OA \times n.$$

Se ve que cuando el punto A está en el medio más refringente, OA' es inferior a OA porque, en este caso, $n < 1$. Por otra parte, el valor que acabamos de hallar para OA no depende del ángulo i ; sino que es el mismo en todos los rayos, con tal que el ángulo i sea muy pequeño, es decir, que el rayo considerado esté muy cerca de la normal.

La relación [1] da la distancia OA', cuando se conoce la distancia OA. Por ejemplo, si el punto A está situado en el agua, n es igual a $\frac{3}{4}$ y la distancia OA' es igual a $\frac{3}{4}$ de la distancia OA.

OBSERVACIÓN. — Si se mira a A en dirección distante de la normal, no se ve una imagen A' clara, porque todos los rayos refractados que caen en el ojo, no se encuentran en el mismo punto. Se demuestra que, en este caso, tales rayos cortan a dos pequeñas rectas denominadas *rectas focales*, una de las cuales es un segmento de la normal AO, y la otra es perpendicular al plano que pasa por el ojo y por el punto A.

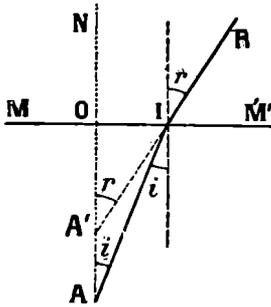


Fig. 534.

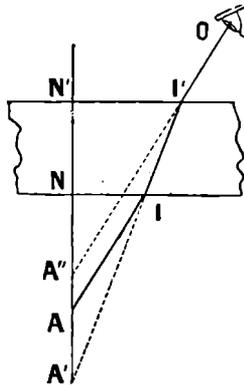


Fig. 535.

punto A. Un rayo AI se refracta como si procediese de A', de tal modo que $NA' = n.NA$. El rayo, que parece que viene de A', se refracta en la segunda cara y entonces parece proceder de A'', tal que $N'A'' = N'A' \times \frac{1}{n}$; puesto que, en la segunda refracción, el índice es $\frac{1}{n}$. Calculemos el levantamiento $a = NA - NA''$ y tendremos :

$$NA'' = N'A'' - e = \frac{N'A'}{n} - e.$$

y,

$$N'A' = e + NA' = e + n \times NA.$$

Luego
$$NA'' = \frac{c}{n} + NA - c.$$

De donde
$$a = c - \frac{c}{n} = c \left(1 - \frac{1}{n}\right).$$

516. **Espejismo.** — El espejismo es una ilusión óptica que hace ver la imagen invertida de objetos lejanos. Este fenómeno se observa frecuentemente en los países cálidos, y particularmente en las llanuras arenosas de Egipto; el suelo ofrece el aspecto de un lago tranquilo, en el cual se reflejan los árboles y pueblos próximos.

Explicación de Monge. — El espejismo ha sido observado desde la más remota antigüedad; pero Monge fué el primero que dió una expli-

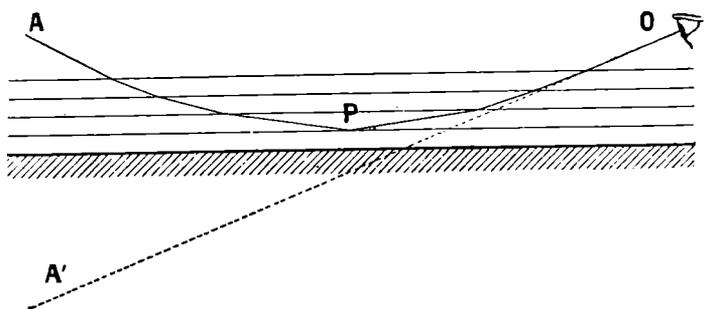


Fig. 536.

cación elemental, según la cual el espejismo es un efecto de *reflexión total*. Sobre la arena ardiente del desierto, como las capas de aire se calientan con su contacto, se sobreponen por orden de densidades crecientes *de abajo arriba*. Un rayo luminoso que proceda de un objeto elevado A (fig. 536) y se dirija hacia el suelo, atraviesa capas cada vez menos densas y, por consiguiente, cada vez menos refringentes; por tanto, el ángulo de incidencia crece de una capa a la siguiente, y acaba por alcanzar un valor límite: entonces, el rayo sufre la reflexión total; se eleva, y se refracta siguiendo un camino inverso y simétrico al de la curva AP, porque, entonces, pasa por capas cada vez más refringentes. La luz llega, pues, al ojo del observador en la misma dirección que si emanase de un punto A' situado debajo del suelo; el observador ve, por consiguiente, una imagen invertida del objeto, como si se hubiera reflejado en el punto P, en la superficie de un agua tranquila.

Comprobación. — Experimentos de Macé de Lepinay y Perot. — Para comprobar la teoría de Monge basta lanzar un haz estrecho de luz de modo que rase la superficie de una lámina de palastro caliente. De este modo, se ve que la imagen dada por el haz se eleva sobre la lámina después de haber experimentado una especie de reflexión sobre la capa de aire caliente; pero no se pudo seguir con la vista la marcha de la luz. M. J. Macé de Lepinay y Perot han obtenido este resultado por los experimentos siguientes.

1º En una cubeta de vidrio bastante larga (fig. 537) se superponen dos líquidos de densidades e índices diferentes, agua y agua salada, y se espera a que estos líquidos se hayan mezclado un poco por difusión. En estas condiciones se obtiene una serie de capas superpuestas, cuyo índice varía de manera continua y conforme a una ley *enteramente análoga a la del aire caliente por contacto del suelo*. En esta cubeta se lanza un haz plano (a través de dos hendiduras sucesivas) en una dirección ligeramente oblicua

de abajo arriba. Este haz va a lamer una lámina de metal pintada de blanco, sumergida verticalmente en la cubeta, en la cual dibuja una traza en forma de línea, primero rec-

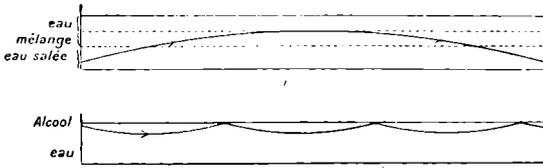


Fig. 537.

tilínea, que después se eleva y se inclina en seguida hacia abajo. Esta trayectoria es inversa a la del espejismo natural, porque el índice va creciendo de arriba abajo.

2º Si se quiere realizar las condiciones naturales del espejismo, se superponen agua y alcohol; — porque el más ligero de estos dos líquidos es el

que tiene mayor índice — y se hará directamente visible el haz agregando al líquido un poquito de fluoresceína. Si el alcohol no tiene más de 1 a 2 centímetros de espesor, el haz luminoso baja una vez para elevarse en seguida, experimentando en el alcohol la reflexión total ordinaria contra el aire; luego vuelve a bajar para elevarse otra vez, produciendo un segundo espejismo, y así sucesivamente. Los autores de este experimento le han dado el nombre de *quirnada luminosa*.

PRISMA

517. Definiciones. — Refracción de un rayo luminoso por un prisma.

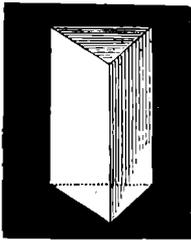


Fig. 538.

— Llámase *prisma* a todo medio transparente comprendido entre dos caras planas, inclinadas una sobre otra.

La intersección de estas dos caras es una línea recta que se denomina *arista* del prisma, y el ángulo diedro que comprenden es su *ángulo refringente*; toda sección perpendicular a la arista es una *sección principal*. Los prismas que se emplean en óptica tienen la forma geométrica de prismas triangulares rectos (fig. 538), y su sección principal es un triángulo ABC (fig. 539). En esta sección, el punto A toma el nombre de *vértice* del prisma, la recta BC es su *base* y el ángulo plano BAC es su *ángulo refringente*.

Refracción en la sección principal. — Cuando un rayo luminoso SI (fig. 539) incide en una sección principal, permanece allí refractándose según H'R. Estas dos refracciones sucesivas desvían la luz en el

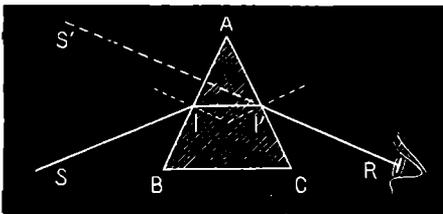


Fig. 539.

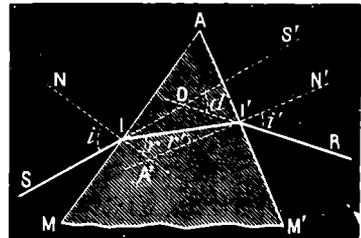


Fig. 540.

mismo sentido, de modo que *el rayo emergente IR sale inclinado hacia la base del prisma*.

Además, si se reciben en la vista los rayos emergentes, se ve necesariamente en S' el punto luminoso, en su dirección prolongada : luego, los objetos vistos a través de un prisma parecen levantados en dirección de su vértice.

Por fin, esta imagen S' es virtual, puesto que está formada por las prolongaciones de los rayos.

Desviación. — La desviación que el prisma comunica a la luz, se mide por el ángulo $S'OR$ (fig. 540).

§18. **Fórmula del prisma.** — Sea A el ángulo del prisma, i el ángulo de incidencia, a la primera cara, r' el ángulo de refracción correspondiente, r el ángulo de incidencia a la segunda cara, i' el ángulo de emergencia, d la desviación y n el índice de la sustancia del prisma. Tiénese primeramente :

$$[1] \quad \text{sen } i = n \text{ sen } r,$$

$$[2] \quad \text{sen } i' = n \text{ sen } r'.$$

Además, el ángulo de la dos normales es igual al ángulo A , porque los lados de estos dos ángulos son perpendiculares, y por ser también externo al triángulo $A'II'$.

Se tiene.

$$[3] \quad r + r' = A.$$

En fin, por ser el ángulo d exterior al triángulo OII' , es igual a la suma de los ángulos en la base, $II'O$ e $I'IO$. Pero se comprende fácilmente que $II'O = i' - r$ y que $I'IO = i - r$. Tiénese pues.

$$d = i - r + i' - r' \quad \text{de donde} \quad d = i + i' - (r + r').$$

Finalmente.

$$[4] \quad d = i + i' - A.$$

Estas cuatro ecuaciones constituyen las *fórmulas del prisma*.

§19. **Estudio experimental de la desviación.** — 1º *d* cree con n . —

Poliprisma. — Llámase *poliprisma* a un prisma formado de varios prismas del mismo ángulo, unidos por sus secciones principales (fig. 551); son de sustancias desigualmente refringentes, por ejemplo de vidrio, de flint, de cristal de roca, de crown. Ahora bien, si se mira una línea recta a través del poliprisma, se ven sus diferentes partes a alturas desiguales. La porción más *elevada* es la que se ve a través del flint, cuyo índice de refracción es el mayor.

2º *d* cree con A . — *Prisma de ángulo variable.* — Se toman dos espejos m y n móviles por medio de charnelas, y que pueden deslizarse con frotamiento duro entre dos placas de cobre paralelas B y C , fijas en un montante (fig. 452), de modo que forman con estas placas una especie de vaso perfectamente cerrado. Echando en él agua o cualquier otro líquido transparente, e inclinándolo más o menos los espejos, se obtiene un *prisma de ángulo variable*.

Si se recibe en una de sus caras un rayo luminoso S , inclinándolo la otra cada vez más, el ángulo del prisma crece y se ve que va aumentando la desviación del rayo emergente E .

3º *d* varia con *i*. — *Desviación mínima*. — Cuando, en un cuarto oscuro, se recibe un haz de luz solar que haya atravesado un cristal rojo, este haz proyecta una mancha luminosa C (fig. 543, I,) en una pantalla lejana. Pero, si entre la abertura de la contraventana y la pan-



Fig. 511.

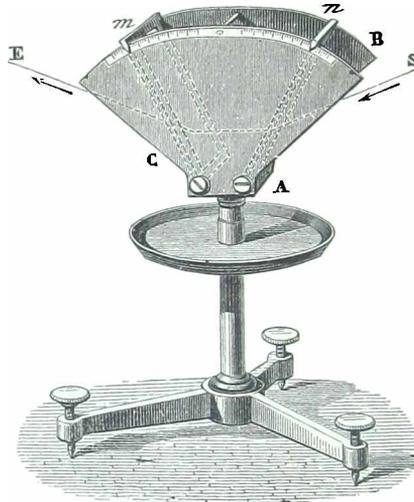


Fig. 542.

talla, se interpone un prisma, de tal modo que la incidencia sea casi rasante, desvíase el haz hacia la base del prisma y se proyecta en D : la distancia CD mide la desviación. Ahora bien, si se da vueltas al pie del prisma, de manera que disminuya gradualmente el ángulo de incidencia, se ve que el haz D se aproxima gradualmente al punto C. Pero, si a partir de determinada posición del prisma, continúa disminuyendo *i*, el haz, después de llegar a la posición D' (fig. 543, II), vuelve

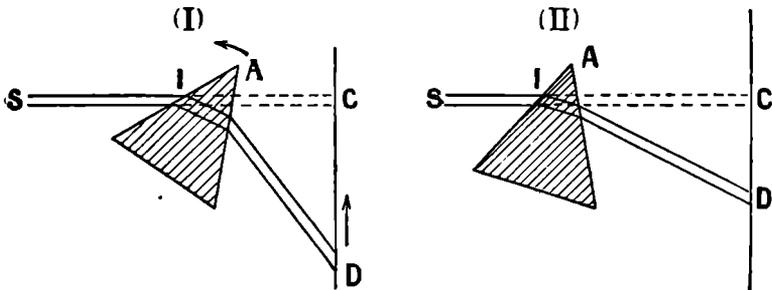


Fig. 543.

sobre sí mismo, hacia el punto D : lo cual prueba que la desviación *aumenta* después de haber *disminuido*, aunque siempre se dé vueltas al prisma en el mismo sentido. La desviación es, pues, *mínima*, para cierto valor de *i*.

Los experimentos y la teoría han demostrado que, en el momento

del *mínimum de desviación*, la parte interior del rayo refractado se inclina igualmente sobre las dos caras del prisma. De donde se deduce, que los dos ángulos de refracción r y r' son iguales, así como los ángulos i e i' .

520. *Estudio teórico de la desviación.* — 1º *Disminuta con n .* — En efecto, supongamos que i y A son constantes; si n crece, r disminuye (según la ecuación 1), r' aumenta (según la ecuación 3) y, en fin, i' crece. Luego en la fórmula [4], como i' aumenta cuando i y A permanecen fijos, d aumentará.

2º. *d crece con A .* — En efecto, por ser i constante, lo es también r . Y puesto que A crece, será porque también crecerá r' (fórmula 3). Lo mismo ocurre con i' ; pero $i' - r'$ aumenta al mismo tiempo que i' (507). Luego la desviación $d = i - r + i' - r'$ aumenta.

3º. *Variación de d con i .* — El experimento nos ha dado a conocer la existencia del *mínimum de desviación*. Vamos a investigar para qué valor de i se produce este *mínimum*. Notemos, en primer lugar, que, si i aumenta, i' disminuye. En efecto, r aumenta entonces, luego r' disminuye y, finalmente, i' decrece.

Por otra parte, sea i , un valor del ángulo de incidencia e i' , el valor correspondiente del ángulo de emergencia: si el ángulo de incidencia se hace igual a i' , el ángulo de emergencia será igual a i , en virtud del regreso inverso de la luz, y, por consiguiente, la desviación toma el mismo valor.

Construyamos la curva (fig. 544) que representa las variaciones de d en función de i . Para los dos valores $i = i$, e $i = i'$, hallaremos dos puntos M_1 y N_1 que tengan la misma ordenada. Del mismo modo, si consideramos un valor i_2 mayor que i_1 , y el valor correspondiente $i'_2 < i'_1$, volveremos a encontrar dos puntos M_2 N_2 que tengan igual ordenada, y así sucesivamente.

La curva que representa la variación de d debe tener un *mínimo*. Por lo tanto ofrecerá la forma indicada en la figura y el *mínimo* se presentará evidentemente cuando los dos ángulos i e i' sean iguales.

En este caso, y designando por δ la desviación mínima y por i_m la incidencia correspondiente, tendremos:

$$\delta = 2i_m - A \quad \text{y} \quad r = r' = \frac{A}{2}.$$

521. *Condición de emergencia en los prismas.* — En cuanto precede, hemos supuesto que el rayo que penetraba en el prisma por I salía de él por I' . Ahora bien, la emergencia no siempre se efectúa, porque el rayo debe pasar de un medio más refringente a otro que lo es menos. Se demuestra que los rayos luminosos refractados por la primera cara de un prisma no pueden salir a través de la segunda sino en tanto que el ángulo refringente del prisma es menor que el doble del ángulo límite de la sustancia del prisma.

En efecto, sea λ el ángulo límite (fig. 545), todos los rayos que inciden en I pueden penetrar evidentemente en el prisma, sea cual fuere su ángulo de incidencia. Allí quedan comprendidos en un ángulo igual a 2λ y que tiene como bisectriz la normal IN . El rayo SI' no puede emerger sino en el caso de que el ángulo de incidencia interior r' tenga un valor inferior o todo lo más igual a λ .

Tracemos desde el punto I una perpendicular IN' a la cara de emergencia; siendo el ángulo $\angle IN'$ igual a r' todo rayo emergente debe formar con esta normal un ángulo $< \lambda$, o $= \lambda$; luego, los rayos que emergen están comprendidos en un segundo ángulo, igual al precedente, y que tiene como bisectriz IN' .

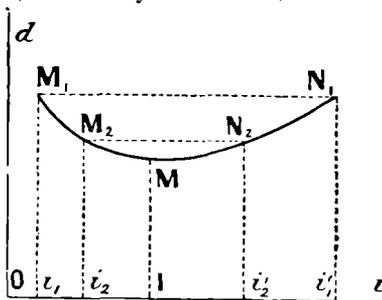


Fig. 544.

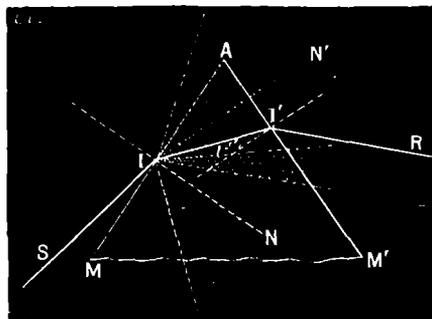


Fig. 545.

El lugar de los rayos que emergen entre los que han penetrado, es pues *la parte del plano común a estos dos ángulos*.

Para que haya un haz emergente, precisa que estos dos ángulos se corten: ahora bien, la condición de intersección es evidentemente que las bisectrices IN e IN' formen entre ellas un ángulo $NIN < 2\lambda$, o todo lo más $= 2\lambda$; pero el ángulo NIN es precisamente igual al ángulo A : la condición de intersección es pues $A \leq 2\lambda$.

522. Prismas de reflexión total. — Un prisma de vidrio, cuya sección es un triángulo rectángulo isósceles (fig. 546) puede, por la reflexión total, reemplazar un espejo.

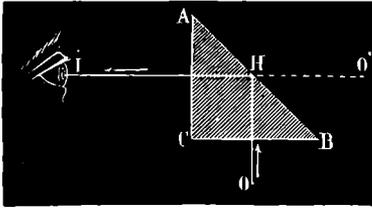


Fig. 546.

Y en efecto, el rayo, OH , perpendicular a la cara BC , entra en el vidrio sin refracción y va a formar con la cara AB un ángulo igual a 45° , mayor que el ángulo límite que es $41^\circ 48'$; luego en H sufre la reflexión total, que le imprime una dirección HI perpendicular a la segunda cara AC . De manera que la cara mayor del prisma produce aquí el efecto del espejo plano más perfecto, y la vista situada en I ve en O' la imagen simétrica del punto O .

aquí el efecto del espejo plano más perfecto, y la vista situada en I ve en O' la imagen simétrica del punto O .

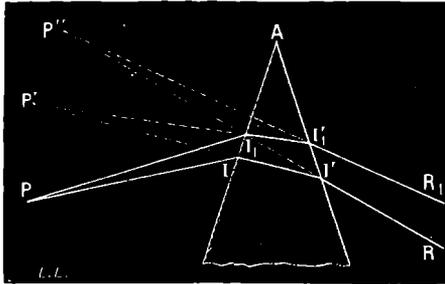


Fig. 547.

523. Imagen dada por un prisma. — Si un haz luminoso PIL , (fig. 547) procedente de un punto P , penetra en un prisma, toma, primero, la dirección $P'I_1$. Después de refractarse en la segunda cara, toma la dirección $P''RR_1$, y parece que procede de P'' , que es la imagen definitiva (virtual) de P , dada por el prisma.

En realidad, sólo hay verdadera imagen cuando el haz incide de tal manera que sufre la desviación mínima.

521. Medida de los índices. — Newton dedujo de la desviación mínima un método general para medir los índices de refracción de los cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos: Consiste en aplicar la fórmula de la desviación mínima. Tiénesse, por una parte,

$$i_m = \frac{A + \delta}{2} \quad \text{y} \quad r_m = \frac{A}{2};$$

donde se deduce

$$n = \text{sen.} \frac{A + \delta}{2} \quad \text{sen.} \frac{A}{2}.$$

Basta con determinar directamente A y δ .

Estas dos medidas se efectúan con un mismo instrumento, el *goniómetro*.

Este método se aplica directamente a los sólidos que se tallan en forma de prisma. Para aplicarlo a un líquido, introdúcese éste en un vaso en forma de prisma, en el cual dos caras están formadas por láminas de cristal de caras paralelas que no dan ninguna desviación a los rayos luminosos.

Refractómetros. — El método del prisma tiene el inconveniente de que se necesita una cantidad notable del cuerpo cuyo índice se quiere medir. Para los cuerpos de los cuales sólo se posee una pequeña muestra, y, principalmente, para los líquidos, se emplean aparatos llamados *refractómetros*, fundados casi todos en el fenómeno de la reflexión total (refractómetros de Pulfrich, de Abbe). Su principio es el siguiente. Sea un prisma o un cilindro de vidrio muy refringente, de índice conocido n y cuya sección es $MM'PP'$ (fig. 548). Se pone en la base MM' una gota de líquido, de índice desconocido $x < n$. Estando alumbrada con luz difusa la cara MP , el rayo S sufre la reflexión total

en I, si en ese punto forma el ángulo de incidencia l tal que $\text{sen } l = \frac{x}{n}$; sale en seguida en A y el ángulo de emergencia α es tal que

$$\text{sen. } \alpha = n \text{ sen. } \left(\frac{\pi}{2} - l \right) = n \cos. l = n \sqrt{1 - \frac{x^2}{n^2}} = \sqrt{n^2 - x^2}.$$

Por consiguiente

$$x = \sqrt{n^2 - \text{sen.}^2 \alpha}.$$

Supongamos que se mira la luz emergente con un anteojo arreglado para la visión al infinito; se ve el campo de este anteojo dividido en dos regiones (fig. 548, II), una bri-

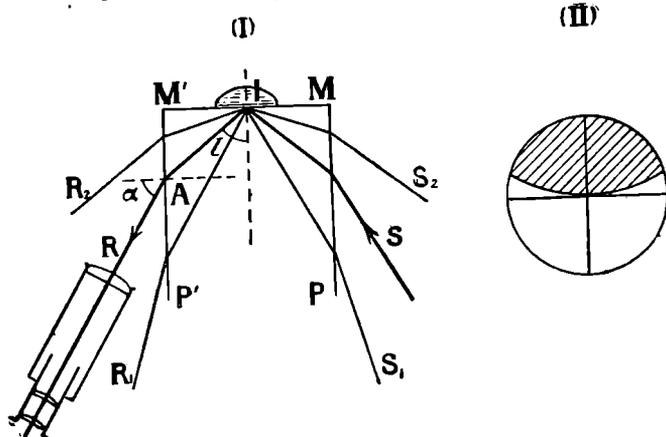


Fig. 548.

llante, producida por los rayos tales que S_2 , que, cayendo sobre la gota con una incidencia mayor que S , se reflejan totalmente; otra más oscura procedente de los rayos tales que S_1 , que han caído sobre la gota con una incidencia menor que l y sólo se han reflejado parcialmente.

La medida de x se deduce del conocimiento de α .

Tratándose de un sólido, se pone una laminita de éste que tenga una cara plana, en la base MM' , interponiendo un líquido de gran índice (naftalina monobromada); se demuestra que el ángulo α de emergencia del rayo emergente, que se ha reflejado totalmente es el mismo que si la reflexión total se hubiera verificado directamente del vidrio de $PMM'P'$ sobre el sólido, y se hace la operación como anteriormente.

VALORES DE ALGUNOS ÍNDICES DE REFRACCIÓN :

Sal gema	1,544	Agua	1,333
Crown-glass ordinario	1,516	Alcohol etílico	1,361
Flint-glass pesado.	1,616	Bencina	1,501
Diamante	2,417	Sulfuro de carbono	1,629

525. Aplicaciones de la medida de los índices. — Refractómetro de Amagat. — Amagat ha mandado construir un aparato preparado para determinar rápidamente, con algunos centímetros cúbicos de líquido, el grado de soluciones acuosas o no acuosas; constituye un alcoholímetro tan exacto como rápido.

Los cortes horizontal y vertical (fig. 549, I y II) representan los principales detalles del aparato. A es un pequeño cilindro metálico en cuyas paredes hay dos espejos C y C' que, formando un ángulo a propósito, constituyen un prisma hueco, en el cual se vierte la solución por determinar. Esta pieza se halla instalada en el centro de un pequeño cubo circular provisto de dos tubitos opuestos y cerrados por espejos paralelos D y D'; el espacio BB está lleno de un líquido de comparación que, para las soluciones acuosas, es agua. Un colimador (615) FL y un anteojo OL' se hallan colocados uno en la prolongación del otro. El conjunto forma, pues, un refractómetro, en el cual la desviación del rayo luminoso depende de la diferencia de los índices de los líquidos introducidos en A y en B. Si éstos son idénticos, la desviación es nula a cualquier temperatura. La

imagen de la abertura F del colimador se produce en una escala fotográfica transparente H, situada delante del ocular.

El número de la división en que se produce esta imagen, da la determinación que se busca, ya por lectura directa, como en el aparato especialmente dispuesto por Amagat

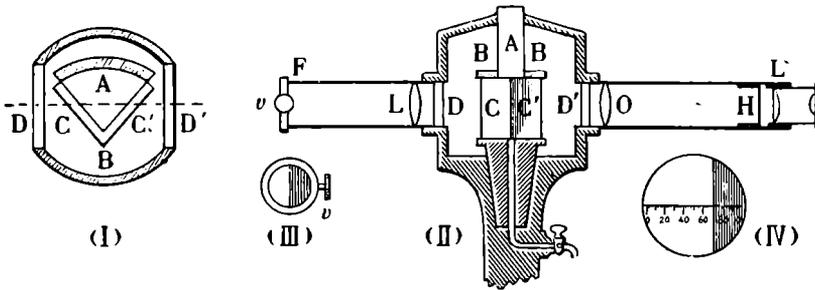


Fig. 549.

para el alcoholímetro, ya por medio de tablas relativas a las distintas sustancias. En este caso, la escala es arbitraria. A pesar de la compensación debida a la presencia de dos líquidos en A y en B, es necesario, sobre todo para el alcohol, efectuar una ligera corrección relativa a la temperatura, para lo cual existen tablas a propósito.

Convien emplear, en F, una abertura medio cerrada por una ventanilla (fig. 549, III). La imagen del borde vertical de esta ventanilla separa el campo (fig. 549, IV) en dos partes, una iluminada, otra semioscura.

Para investigaciones de precisión, hay un cubo suplementario que rodea a B y permite obtener una temperatura rigurosamente constante. Cuando se debe operar a temperaturas superiores a la de la atmósfera, es indispensable este cubo: éste es el mecanismo adoptado en el aparato conocido con el nombre de *oleorefractómetro* Amagat y Jean. Este último aparato está destinado a reconocer las falsificaciones de materias grasas (mantecas, aceites, etc.) por el estudio de su índice de refracción.

CAPÍTULO VI

LENTEs ESFÉRICAS

526. **Definiciones.** — Dase el nombre de *lentes* esféricas a medios transparentes terminados por dos caras esféricas o por una superficie esférica y un plano.

Hay seis clases de lentes esféricas (fig. 550 y 551). La primera, A, se llama *biconvexa*; la segunda, B, *plano-convexa*; la tercera, C, *cóncavo-convexa de bordes delgados*; la cuarta, D, *bicóncava*; la quinta, E, *plano-cóncava*, y la última, F, *cóncavo-convexa de gruesos bordes*. La lente C se denomina también *menisco convergente* y la F, *menisco divergente*.

Los centros de las esferas llámanse *centros de curvatura*, y la recta trazada por los dos centros es el *eje principal* (fig. 552). En una lente plano-cóncava o plano-convexa el eje principal es la perpendicular bajada del centro de la cara esférica a la cara plana. Todo rayo que sigue la dirección del eje principal atraviesa la lente sin desviación.

Denominase *sección principal* de una lente, toda sección producida por un plano que pase por el eje principal.

Mecanismo de la convergencia. — La refracción en las lentes puede asimilarse a la refracción en los prismas suponiéndolos limitados por una *infinidad* de elementos planos *infinitamente pequeños*.

En efecto, en los puntos I e I' pueden imaginarse dos superficies planas inclinadas entre sí que produzcan el efecto de un prisma de ángulo A. Y, en este caso, cada una de las lentes A, B, C (fig. 550) puede asimi-

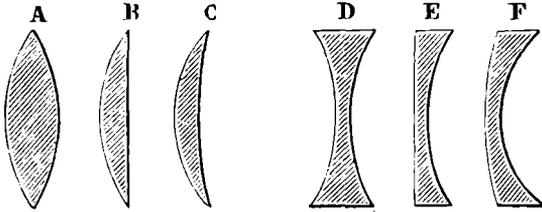


Fig. 550.

Fig. 551.

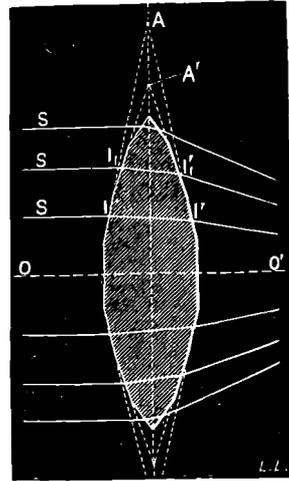


Fig. 552.

larse a un conjunto de prismas cuyas bases estén vueltas hacia el eje principal OO'. y las lentes D E F (fig. 551) a una serie de prismas vueltos en sentido contrario. Esto indica por qué las primeras deben hacer *converger* los rayos hacia el eje, y las segundas los hacen *divergir*. Por esta razón, todas las lentes de bordes delgados son *convergentes*, y las de bordes gruesos, *divergentes*.

En el estudio de las lentes admitiremos, *para una primera aproximación**, las hipótesis siguientes :

1ª Las lentes son *delgadas*, es decir, que puede despreciarse su espesor :

2ª Tienen *pequeña abertura* (10° a 12°), y no admiten sino *rayos centrales*, esto es, rayos *poco distantes* del eje y *poco inclinados* sobre su dirección.

Todas las construcciones se efectuarán en el plano de la sección principal que contiene el punto luminoso o el centro del objeto luminoso. Y se simplificarán por el hecho de que la lente delgada puede representarse por una simple línea recta. Para distinguir las dos especies de lentes, se dibujan, en los dos extremos de esta recta, los extremos de las caras esféricas (fig. 554 y 570).

527. **Centro óptico.** — **Ejes secundarios.** — El punto en que una lente delgada es cortada por su eje óptico se llama su *centro óptico*. Toda recta que pase por el centro óptico, distinto del eje principal, se denomina *eje secundario*.

Los experimentos y la teoría demuestran que todo rayo que sigue la dirección de un eje secundario atraviesa la lente sin desviación.

* Que constituye la *teoría de las lentes delgadas*.

Demostración teórica de las propiedades del centro óptico. — Consideremos, por ejemplo, una lente biconvexa de cualquier espesor, y sean CC' (fig. 553) los centros de curvatura de sus dos caras. Tracemos dos radios geométricos CI , $C'I'$ paralelos. Sea además un rayo luminoso que, en lo interior de la lente, sigue el camino II' . Los planos tangentes en I e I' a las caras de la lente son paralelos, puesto que son perpendiculares respectivamente a los rayos CI y $C'I'$. El rayo incidente SI , de donde proviene el rayo II' , y el rayo emergente correspondiente $I'R$ son, pues, paralelos, porque, para este rayo, todo ha ocurrido como si hubiese atravesado una lámina de caras paralelas. Vamos a demostrar que el rayo interior II' corta al eje en un punto O , que es un punto fijo, es decir que si consideramos todos los rayos que dan, a la salida, un rayo paralelo a su dirección incidente, el rayo interior correspondiente pasa por el punto O . Este punto O es el *centro óptico* de la lente gruesa considerada.

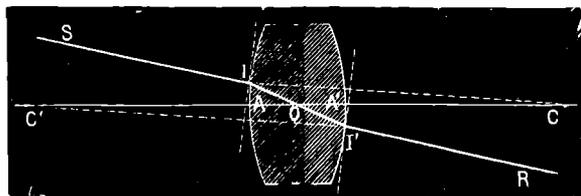


Fig. 553.

En efecto, los triángulos semejantes COI y $C'OI'$ dan

$$\frac{CC'}{OC} = \frac{C'I'}{CI} = \frac{R'}{R}.$$

El punto O divide el segmento CC' en dos segmentos proporcionales a los rayos $R'R'$: luego es un punto fijo sea cual fuere II' .

Por otra parte se tiene

$$\frac{R}{R'} = \frac{R - OC}{R' - OC'} = \frac{OA}{OA'}.$$

Luego el punto O divide el grueso de la lente en dos segmentos proporcionales a los rayos de las caras; es pues el grueso de la lente.

Pero, si este grueso se hace infinitamente pequeño, el punto O se confunde a la vez con A y A' . Al mismo tiempo, los rayos SI , II' , $I'R$ están en línea recta; forman un *eje secundario* y se ve, por la demostración anterior, que todo rayo que sigue la dirección del eje secundario atraviesa la lente, sin sufrir ninguna desviación.

Para todas las formas de lentes se podría demostrar la existencia de un centro óptico que posee la misma propiedad: si, en el interior de la lente, la dirección del rayo pasa por ese punto, los rayos incidente y emergente correspondientes son paralelos. Cuando la lente se hace infinitamente delgada, este punto se confunde siempre con el punto en que la lente es cortada por su eje principal.

528. Estudio de las lentes convergentes infinitamente delgadas. —

Focos. — Plano focal. — Si un haz de rayos paralelos incide en una

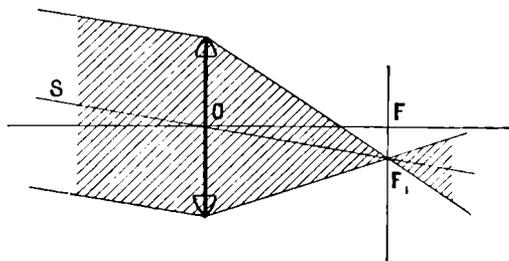


Fig. 554.

lente convergente, todos estos rayos, una vez refractados, pasan por un mismo punto llamado *foco*. Este foco está situado en el eje paralelo a los rayos, y los diversos focos que corresponden a las distintas direcciones de rayos paralelos se hallan a igual distancia de la lente.

En efecto, coloquemos una pequeña fuente luminosa brillante (por ejemplo, un arco eléctrico), a gran distancia de una lente convergente, de tal modo, que los rayos que recibe esta lente puedan consi-

derarse como paralelos. Si al otro lado de la lente se mueve una pequeña pantalla blanca, se hallará fácilmente un foco F_1 (fig. 554) en donde se cortarán los rayos refractados.

Este punto F_1 está necesariamente en el eje secundario paralelo a los rayos; puesto que el rayo SO , que sigue la dirección del eje, no ha sufrido desviación.

Por otra parte, si se hace girar la lente un pequeño ángulo alrededor de un eje perpendicular al plano de la figura y que pase por el punto O , se observará que el foco no cambia de lugar. De modo que todo sucede como si la lente estuviera fija y como si cambiase la dirección de los rayos paralelos que ésta recibe. Este experimento demuestra que los focos correspondientes a las diversas direcciones de rayos paralelos se encuentran a la misma distancia de la lente.

Foco principal. — El foco F' (fig. 555) que corresponde a los rayos paralelos al eje principal se llama *foco principal*. La distancia de este foco a la lente se denomina *distancia focal* de esta lente. Para el sentido de la luz considerado (de izquierda a derecha), el foco F' se llama *foco-imagen*, porque es la imagen de un punto al infinito.

Plano focal. — El conjunto de focos se halla en un pequeño casquete

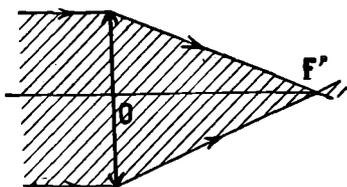


Fig. 555.

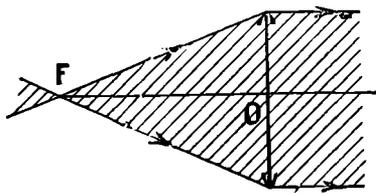


Fig. 556.

esférico de centro O , que tiene por radio la distancia focal. Pero, como sólo se consideran direcciones de rayos paralelos que forman un pequeño ángulo con el eje, se puede confundir este casquete esférico con su plano tangente FF_1 (fig. 554) en el punto F' . Este plano, que es perpendicular al eje principal y es también el lugar geométrico de los dos focos, se llama *plano focal-imagen* de la lente.

Existencia de dos focos principales y de dos planos focales. — Si se hacen incidir rayos paralelos al eje principal en la otra cara de la lente, por ejemplo (fig. 556), convergen en un foco F , simétrico de F' con relación a la lente.

Esta propiedad se demuestra fácilmente. Basta hacer girar la lente 180° en su soporte, en el experimento anterior, y se observará que el foco no varía.

Punto luminoso situado en un foco. — Si se coloca un punto luminoso en un punto cualquiera, de un plano focal, F por ejemplo, los rayos que envía a la lente saldrán, en virtud del regreso inverso de la luz, paralelamente al eje correspondiente. Para el sentido de propagación de la luz de izquierda a derecha, F se llama *foco-objeto*, porque si se pone en F un

punto objeto, su imagen se produce al infinito. El plano perpendicular al eje principal y que pasa por F es el *plano focal-objeto*.

OBSERVACIONES. — 1º Los dos focos de una lente convergente son reales; 2º Si se cambia el sentido de propagación de la luz, el foco-objeto se convierte en foco-imagen, e inversamente.

529. **Imagen del sol.** — Volvamos hacia el borde inferior del sol el eje principal de una lente convergente. Todos los puntos de este astro pueden considerarse como situados en el infinito, y por tanto, envían haces de rayos paralelos. Cada uno de estos converge en un punto del plano focal; luego la imagen del sol se halla entera en este plano. Su diámetro se calcula como en el caso de un espejo cóncavo (486). Si el borde inferior del astro está en el eje principal, su imagen se reproduce en F' (fig. 554). En este caso, su borde superior está en la dirección OS y forma su imagen en F' . El diámetro de la imagen es $FF' = OF \operatorname{tg} \alpha$, siendo α el diámetro aparente $F, OF = 32'$. Además, FF' pueden reemplazarse por el arco de círculo de $32'$, en la circunferencia de radio OF .

530. **Imágenes reales en las lentes convergentes.** — 1º Si un objeto

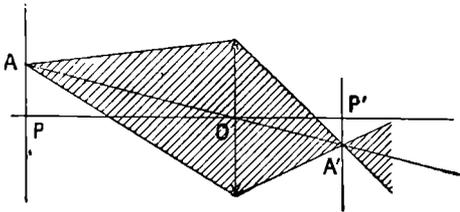


Fig. 557.

luminoso se coloca a una distancia de una lente convergente mayor que su distancia focal, la lente producirá una imagen real de él.

Para demostrarlo, colócase un objeto luminoso, v. gr. una bujía, a suficiente distancia de una lente convergente delgada, y se

verá dibujada en una pantalla blanca, dispuesta al otro lado de la lente, una imagen real e invertida de la bujía.

Todos los rayos procedentes de un punto A (fig. 557) de la llama que inciden en la lente, pasan, después de refractados, por un mismo punto A' .

Además, puesto que el rayo AO atraviesa la lente sin desviación, la imagen A' estará situada en el eje secundario AO del punto A .

En fin, en virtud del regreso inverso de los rayos, si en A' hubiera un punto luminoso, habría, en A , una imagen real.

2º *Planos conjugados.* — Todos los puntos de un plano AP (fig. 557)

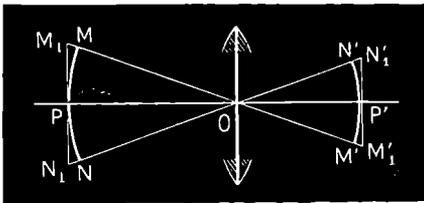


Fig. 558.

perpendicular al eje principal de una lente tienen sus imágenes en otro plano $A'P'$ perpendicular al eje. Los planos AP , $A'P'$ se llaman *conjugados* porque, recíprocamente, los puntos del plano $A'P'$ tienen sus imágenes en el plano AP . Se puede demostrar moviendo una bujía en el plano AP , y se verá que la imagen se mueve en el plano $A'P'$.

También se puede demostrar de modo más preciso, haciendo girar

un poco la lente alrededor de un eje perpendicular al plano de la figura y que pase por O . Se observará que la imagen A' no se mueve. Como todo ocurre cual si, permaneciendo fija la lente, se moviera A ,

manteniéndose a distancia constante del punto O , deducimos que todos los puntos que se hallan a la misma distancia del punto O , tienen también sus imágenes equidistantes de O .

Consideremos un pequeño casquete esférico MPN (fig. 558) de centro O y de vértice P . Las distancias OM, OP, ON , de los puntos objetos al centro óptico son iguales, por lo cual, las distancias OM', OP', ON' de los puntos imágenes serán también iguales. Las imágenes de los puntos del casquete MPN están pues en un casquete esférico $M'P'N'$. Lo mismo que en los espejos esféricos, podemos tomar, en vez de MPN y $M'P'N'$, con sus planos tangentes M_1PN_1 y $M'_1P'_1N'_1$. Por consiguiente, podemos decir que las imágenes de los puntos de un plano M_1PN_1 perpendicular al eje principal están en un plano $M'_1P'_1N'_1$ perpendicular al mismo eje.

531. Construcción y variaciones de la imagen de un objeto. —

Supongamos un objeto AP (fig. 559) perpendicular al eje principal; sabemos que su imagen es también perpendicular a este eje. Por consiguiente, basta construir la imagen de uno de los puntos, A , por ejemplo. Para esto, se traza el eje secundario AO ; luego, desde el punto A , un rayo paralelo al eje principal, que se refracta de modo que pase por el foco-imagen F' ; corta el eje secundario en el punto A' , que es la imagen del punto A ; la perpendicular $A'P'$ al eje principal es la imagen del objeto AP .

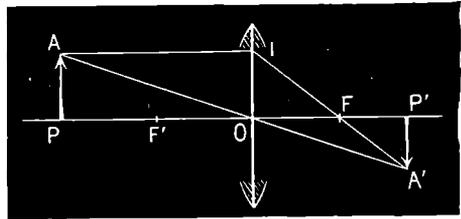


Fig. 559.

Casos particulares. — 1º Cuando el objeto se aleja indefinidamente, la imagen tiende hacia el plano focal-imagen y su magnitud tiende a cero.

2º Si el objeto está a distancia doble de la distancia focal, la imagen se halla a la misma distancia, al otro lado y tiene igual magnitud que el objeto.

En efecto, en el triángulo $A'AI$ (fig. 560), OF' es paralela a la base AI

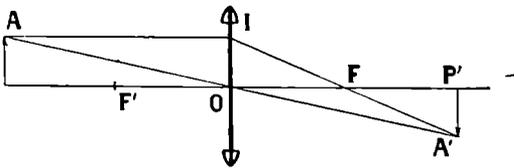


Fig. 560.

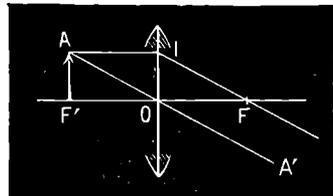


Fig. 561.

y tenemos $AI = 2 OF'$. Por consiguiente, O es el centro de $A'A$ y tendremos $A'O = AO$. Luego los dos triángulos rectángulos $A'OP'$ y AOP son iguales, y, al mismo tiempo, $A'P' = AP$ y $OP' = OP$.

3º Mientras el objeto está más allá del duplo de la distancia focal, la imagen es menor que el objeto. Si, al contrario, el objeto está más acá que el duplo de la distancia focal, la construcción indica que la

imagen es mayor que el objeto y que se halla más distante de la lente.

4º Si el objeto está en el plano focal, no hay imagen; dicese que *la imagen es enviada al infinito* y que es *infinitamente grande*. En efecto, los rayos tales como AI , AO (fig. 561) dan un haz emergente $IF'OA'$ paralelo al eje secundario AO : por lo tanto, ya no concurren los rayos a ninguna distancia.

532. **Imágenes virtuales.** — Si, entre una lente convergente y el plano focal-objeto, colocamos una bujía, es imposible proyectar en una pantalla una imagen real de aquélla; pero si se sitúa el ojo en el trayecto de los rayos refractados, se ve una imagen *virtual* de la bujía. Esto demuestra que las prolongaciones de los rayos refractados procedentes de un punto A (fig. 562), pasan por un mismo punto A' . En este caso, como en el anterior, la imagen A' del punto A se encuentra en

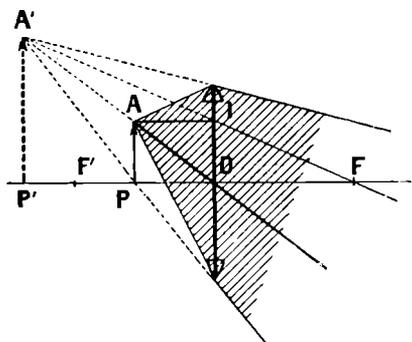


Fig. 562.

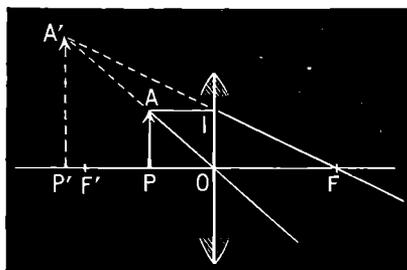


Fig. 563.

el mismo eje secundario AO ; y, si se mueve A en un plano AP perpendicular al eje principal, la imagen A' se mueve en un plano conjugado $A'P'$ perpendicular también a este eje. Se demuestra lo mismo que en las imágenes reales.

Imagen virtual de un objeto. — Supongamos un objeto AP , más acá del plano focal (fig. 563).

Si se repite la misma construcción que en las imágenes reales, se verá fácilmente, considerando el trapecio $AIOF'$, que su base menor es AI (más pequeña que OF'), y, en consecuencia, que la prolongación del rayo refractado corta en A' al eje secundario OA . La imagen de AP se obtiene como en el caso anterior, levantando la perpendicular $A'P'$ al eje principal. Esta imagen virtual es *recta y mayor que el objeto*.

La misma construcción indica que si el objeto se aproxima a la lente, la imagen, muy grande y lejana al principio, se acerca también a la lente. Cuando el objeto se aplica contra la lente, la imagen se confunde con él.

533. **Determinación de la distancia focal de una lente convergente.**
Focómetros. — 1º Se vuelve la lente hacia el sol y se busca, al otro lado de ella, el plano en que la imagen es menor y más brillante; éste es el plano focal. Su distancia a la lente es la distancia focal f de ésta.

2º El método más exacto consiste en buscar la posición que hay que dar a un objeto, perpendicular al eje principal de la lente, para que la imagen real tenga la misma magnitud que el objeto. La distancia de éste a la imagen es, pues, igual a $4f$. Se toma la cuarta parte, y, así, se obtiene la distancia focal.

Para aplicar este método se emplea el *focómetro*. Los focómetros se fabrican de varias maneras, según la exactitud que se desee en las mediciones.

Se puede constituir uno, de la sencilla manera siguiente :

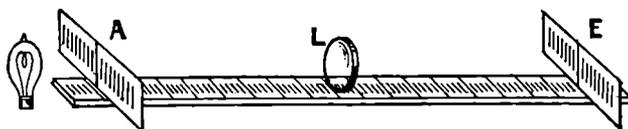


Fig. 564.

En una placa de cristal A (fig. 564) se

pega un papel transparente sobre el cual se traza una división formada por rayitas equidistantes. Esta placa se instala en un plano vertical, perpendicularmente a una regla graduada, en la que se fija la lente por un medio cualquiera (con cera, por ejemplo).

Del mismo modo, colócase en la regla una pantalla E con una graduación idéntica a la de A.

Si ilumina intensamente A y se mueven simultáneamente A y E, de modo que la imagen de la división de A que se forma en E, coincida exactamente con la división de E.

Luego, en la regla graduada, se mide la distancia AE : $AE = 4f$.

534. Convergencia. — Dióptrica. — Una lente es tanto más convergente cuanto menor es su distancia focal. *Se ha convenido en medir la convergencia de una lente por la inversa $\frac{1}{f}$ de su distancia focal, tomando el metro como unidad de longitud.* La unidad de convergencia resulta ser la convergencia de una lente que tiene 1 metro de distancia focal. A esta unidad se llama *dioptría*. Varias lentes cuyas distancias focales sean respectivamente 0,50 m., 0,25 m., 0,10 m., tienen convergencias de 2, 4, 10 dioptrías.

La convergencia de una lente se llama también su *potencia*.

535. Fórmulas de las lentes convergentes. — Cálculo de la distancia focal. — Para hallar estas fórmulas observaremos que todo rayo SI'R (fig. 565) que traspase una lente convergente se halla en el mismo caso que si atravesara un prisma A, de la misma sustancia, que tuviese por caras los planos tangentes en I y en I'. Este prisma es siempre de *pequeña abertura*. Las fórmulas del prisma dan la desviación d . Estas se simplifican notablemente introduciendo en ellas la hipótesis de los ángulos pequeños, la cual consiste en hacer $\text{sen. } i = i$; $\text{sen. } i' = i'$; $\text{sen. } r = r$; $\text{sen. } r' = r'$. Y así, se convierten en :

$$\begin{array}{lll} [1] & i = nr & A = r + r', & [3] \\ [2] & i' = nr' & d = (n - 1) A. & [4] \end{array}$$

Cálculo de la distancia focal principal — Sea SA (fig. 566) uno de los rayos paralelos al eje principal; este rayo, después de sufrir la desviación d que da la fórmula [4], se refracta según AF'. El ángulo d es igual al ángulo AF'O; y como es muy pequeño, puede tomarse como medida de d la tangente AF'O. y tendremos :

$$d = \text{tg. AF'O} = \frac{AO}{F'O}.$$

Por otra parte, el ángulo Λ es igual a la suma de los ángulos MAO y NAO ; y $\text{MAO} = \text{ACO}$ y $\text{NAO} = \text{AC'O}$ (por tener los lados perpendiculares).

Tomando por medida de estos ángulos sus tangentes trigonométricas, tendremos :

$$\Lambda = \text{tg. ACO} + \text{tg. AC'O} = \frac{\text{AO}}{\text{CO}} + \frac{\text{AO}}{\text{C'O}}$$

Sustituyendo en el valor de d y dividiendo por AO , resulta :

$$[1] \quad \frac{1}{\text{F'O}} = (n - 1) \left(\frac{1}{\text{CO}} + \frac{1}{\text{C'O}} \right) \quad \text{o bien} \quad \frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right);$$

porque, como hemos supuesto a la lente infinitamente delgada, se pueden confundir CO y C'O con los radios de curvatura R y R' , y el mismo O , con el centro óptico.

OBSERVACIONES. — 1ª Se ve que la distan-

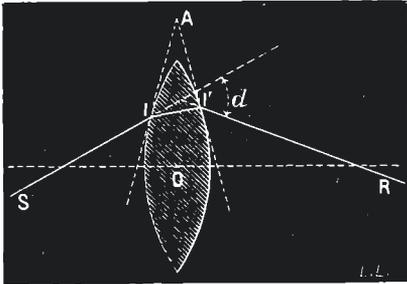


Fig. 565.

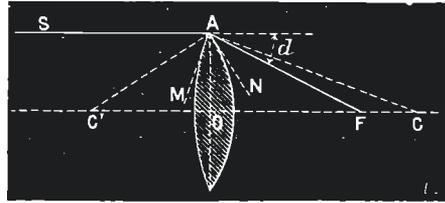


Fig. 566.

cia f es independiente del rayo elegido, lo cual demuestra la existencia del foco principal.

2ª Si una de las caras fuese plana (lente planoconvexa), por el mismo razonamiento hallaríamos $\frac{1}{f} = (n - 1) \frac{1}{R}$. Y, si la cara de radio R' fuese cóncava, pero tal que $R' > R$ (menisco convergente) se hallaría asimismo $\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \right)$. Por consiguiente, en todos casos, se podrá aplicar la fórmula [1], siempre que se considere una cara plana como una cara esférica de radio infinito ($\frac{1}{R} = 0$) y una cara cóncava como una esférica de radio negativo.

536. Relación entre las distancias de un punto objeto y de su imagen al centro óptico de la lente. — Caso de las imágenes reales.

1º El punto P está en el eje principal. — Un rayo PA (fig. 567) sufre la desviación d

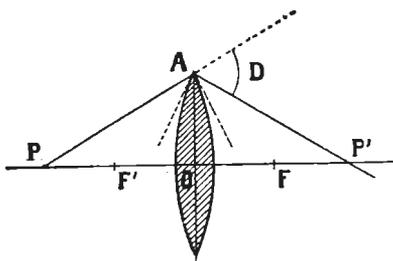


Fig. 567.

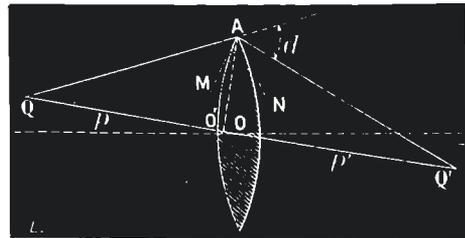


Fig. 568.

y corta al eje principal en P' , que es la imagen real de P . Sean p y p' las distancias OP y OP' .

$$d = \text{APP}' + \text{APP}' \quad ; \quad \text{o} \quad \text{tang. } d = \text{tang. APP}' + \text{tang. APP}'.$$

Ahora bien, la desviación es la misma que en el caso precedente, por ser igual a $(n - 1)\Lambda$.

Luego $d = \frac{\text{AO}}{f}$. Por lo tanto, de la ecuación anterior se deduce :

$$\frac{\text{AO}}{f} = \frac{\text{AO}}{p} + \frac{\text{AO}}{p'}$$

o

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

[2]

Se ve que el valor de p' sacado de esta fórmula, no depende del rayo considerado. Todos los rayos refractados pasan, pues, por el mismo punto P' .

2º *El punto está fuera del eje principal.* — La imagen del punto objeto Q (fig. 568) está en el eje secundario QO ; también está en el rayo refractado que corresponde a un rayo incidente cualquiera QA : luego, estará en la intersección Q' de estas dos rectas. En el triángulo AQQ' , el ángulo externo es d , y tenemos

$$d = AQQ' + A'Q'O;$$

de donde :

$$\frac{AO}{f} = \frac{AO'}{p} + \frac{AO'}{p'} \quad \text{y} \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}. \quad [2 \text{ bis}]$$

Porque se puede tomar AO' por AO , si, como hemos supuesto, el ángulo formado por QQ' con el eje principal es pequeño y el rayo QA se halla poco apartado del eje.

3º *Planos conjugados.* — Las fórmulas [2] y [2 bis] indican que, en los puntos que están a igual distancia de O , esto es, para los cuales p tiene el mismo valor, se halla igual valor para p' , es decir, que las imágenes de estos puntos están también a igual distancia del punto O . De donde se deduce, como antes hemos visto, la propiedad de los planos conjugados.

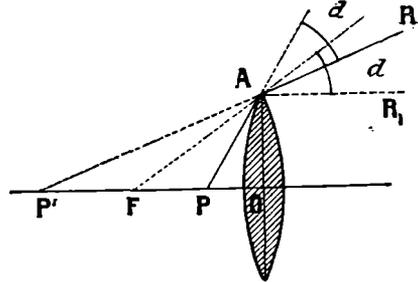


Fig. 569.

537. *Caso de las imágenes virtuales.* — Dado el que un rayo, tal como FA (fig. 569) que emana del foco objeto, emerge de la lente paralelamente al eje principal se deduce que un rayo, tal como PA que emerja sufriendo la misma desviación d , no puede cortar al eje más que por su prolongación y en el mismo lado de la lente. Sea P' el punto de intersección : es la imagen de P , y se ve que es *virtual*. Tenemos, en el triángulo APP' :

$$d = APO - AP'O, \quad \text{o} \quad \text{tang. } d = \text{tg. } APO - \text{tg. } AP'O.$$

De donde en deduce

$$\frac{AO}{f} = \frac{AO}{p} - \frac{AO}{P'}, \quad \text{y de aqui,} \quad \frac{1}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}. \quad [3]$$

OBSERVACIÓN. — Esta fórmula hubiera podido deducirse de la ecuación [2], cambiando de signo a la magnitud p' que ha cambiado de sentido.

538. *Relación entre la magnitud de la imagen de un objeto y la del mismo objeto.* — Sea i la magnitud $A'P'$ de la imagen (fig. 559 y 563) y o la magnitud AP del objeto. Sea real o virtual la imagen, tendremos

$$\frac{A'P'}{AP} = \frac{OP'}{OP},$$

a causa de la semejanza de los triángulos AOP y $A'OP'$. Por lo tanto

$$[4] \quad \frac{i}{o} = \frac{p'}{p}.$$

539. *Discusión de las fórmulas.* — Las fórmulas de las lentes convergentes son exactamente las mismas que las de los espejos cóncavos, a los cuales se pueden comparar por sus propiedades.

De las fórmulas [2] o [2 bis] y [4] se deduce :

$$p' = \frac{pf}{p-f} \quad \text{o} \quad p' = \frac{f}{1 - \frac{f}{p}}$$

y

$$\frac{i}{o} = \frac{f}{p-f}.$$

La discusión de estas fórmulas, hecha como para los espejos cóncavos, conduce a los mismos resultados, que son también los que las construcciones geométricas y los experimentos nos han enseñado en el caso de las imágenes reales.

Del mismo modo, de las fórmulas [3] y [4] se deduce

$$p' = \frac{pf}{f-p} = \frac{f}{\frac{f}{p}-1} \quad \text{y} \quad \frac{i}{o} = \frac{f}{f-p}.$$

Discutidas estas expresiones dan, para las imágenes virtuales, los mismos resultados que los experimentos y construcciones geométricas.

540. **Ecuación de Newton.** — Llamando ω a la distancia del objeto al foco-objeto F ($\omega = FP$), y ω' a la distancia de la imagen al foco-imagen F' ($\omega' = F'P'$), se halla, como en los espejos cóncavos, la fórmula :

$$\omega\omega' = f^2$$

que es la ecuación de Newton.

541. **Lentes divergentes delgadas.** — **Estudio experimental y geométrico.** — Por experimentos y razonamientos análogos a los expuestos para las lentes convergentes, se obtienen los siguientes resultados :

1º **Centro óptico.** — **Ejes secundarios.** — El punto en que una lente divergente infinitamente delgada es cortada por su eje principal se llama su *centro óptico*. Toda recta que pasa por este punto es un *eje secundario*. Si un rayo luminoso se dirige según un eje secundario, traspasa la lente sin desviación.

3º **Imágenes virtuales.** — **Planos conjugados.** — Sea cual fuera la posición de un objeto real (por ejemplo, de una bujía) ante una lente divergente, no hay imagen real; pero se ve la imagen virtual de un punto A (fig. 570) en el eje secundario del punto A. Las prolonga-

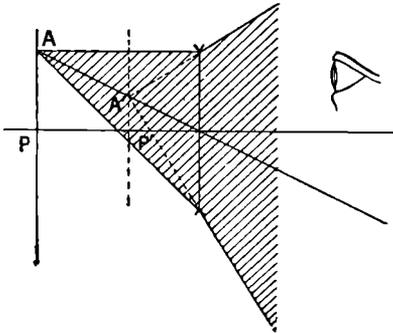


Fig. 570.

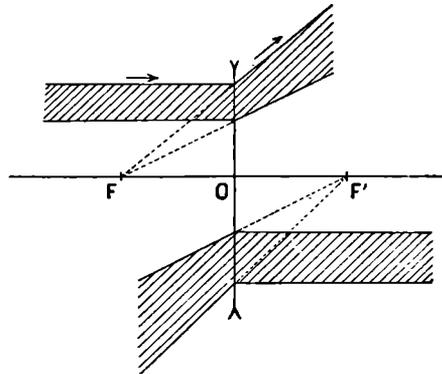


Fig. 571.

ciones de todos los rayos emanados de A pasan, pues, después de la refracción, por el mismo punto A'.

Las imágenes de los puntos de un plano AP perpendicular al eje están también en un plano conjugado A'P' perpendicular al eje.

542. **Focos.** — **Convergencia.** — **Planos focales.** — Los rayos paralelos al eje principal son refractados de manera que sus prolongaciones pasen por un mismo punto F' (fig. 571) : este punto es un foco-imagen virtual. Los rayos que convergen hacia cierto foco-objeto virtual F, situado en el eje principal detrás de la lente, se vuelven paralelos a este eje. Se tiene : $OF = OF' = f$ (f es la distancia focal de la lente).

La inversa de la distancia focal se llama también *convergencia de la*

lente y se mide en *dioptrías*; pero se ha convenido en decir que la convergencia de una lente divergente es negativa.

Los rayos paralelos a un eje secundario cualquiera AO (fig. 572) divergen, después de refractados, del punto F'_1 en que este eje corta al plano focal-imagen que pasa por F' y perpendicular al eje principal. También hay un plano focal-objeto que pasa por F .

543. **Construcción de la imagen de un objeto real.** — Sea AP

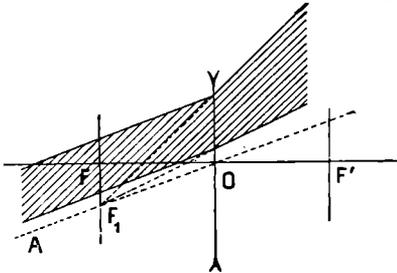


Fig. 572.

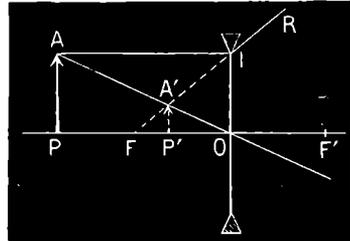


Fig. 573.

(fig. 573) un objeto real. Tracemos el eje secundario AO y el radio AI paralelo al eje. Este último se refracta de tal manera que su prolongación pasa por el foco F' : el punto de encuentro A' de tal prolongación y de AO es la imagen de A, y $A'P'$ es la imagen de AP. Esta imagen es *virtual, recta y menor que el objeto*.

La misma construcción indica que si el objeto está muy distante, la imagen es muy pequeña, se halla muy cerca del plano focal y está colocada más acá, con respecto a la lente. Si el objeto se acerca a ésta, sucede lo mismo con la imagen, y si aquél se aplica contra la lente, la imagen se confunde con él.

544. **Imagen de un objeto virtual en una lente divergente.** — Se realiza un objeto virtual proyectando, mediante una lente convergente, una imagen real AP (fig. 574) é

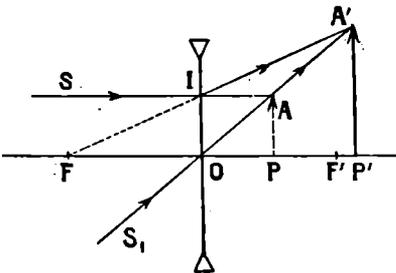


Fig. 574.

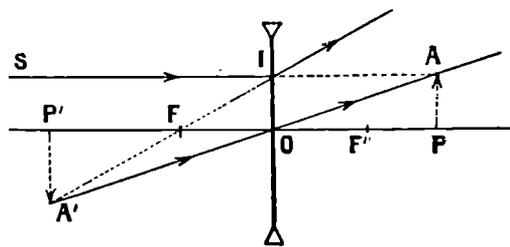


Fig. 575.

interponiendo una lente divergente entre el trayecto de los rayos, antes de que lleguen a AP.

1º *El objeto está más acá del foco.* — Consideremos el rayo que se dirige a A pasando por el centro óptico O; este rayo atraviesa sin desviación la lente. Consideremos también el rayo que llega a A paralelamente al eje principal: se refracta de modo que su prolongación pase por F' y corte al primero en el punto A' : A' es una imagen real de A y $A'P'$ es la imagen de AP; esta imagen es *real, recta y mayor que el objeto*.

Si el objeto virtual se mueve desde la lente hasta su plano focal, la imagen real se mueve de la lente al infinito y, al mismo tiempo, su magnitud aumenta desde la del objeto hasta el infinito.

2º *El objeto está más allá del plano focal.* — En este caso, la imagen se halla en A'P' (fig. 575) y es invertida y virtual, porque los rayos refractados dados por los rayos que se dirigen hacia A no se encuentran; mientras que sus prolongaciones se cortan en A'. Si AP está muy poco más allá de F, la imagen virtual es muy grande y muy lejana. Cuando el objeto se aleja, la imagen virtual se acerca a la lente disminuyendo de magnitud. Cuando el objeto se halla a una distancia doble que la distancia focal, la imagen virtual se encuentra también en el duplo de la distancia focal y su magnitud iguala a la del objeto. Finalmente, si el objeto se aleja infinitamente, la imagen virtual se aproxima a F, al mismo tiempo que su magnitud tiende a cero.

545. **Fórmulas de las lentes divergentes.** — Razonando como en las lentes convergentes se obtienen los siguientes resultados :

I. *Distancias focales.* — 1º *Lente bicóncava de índice n y cuyas caras tienen los radios de curvatura R y R' :* resulta,

$$[1] \quad \frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'} \right).$$

2º *Lente planocóncava :* se halla :

$$[1 \text{ bis}] \quad \frac{1}{f} = (n - 1) \frac{1}{R}.$$

Menisco divergente (siendo mayor el radio de curvatura R' de la cara convexa que el radio de curvatura R de la cara cóncava λ .) Tendremos

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R'} \right).$$

II. *Distancia de la imagen.* — *Caso de la imagen de un objeto real.* — Se obtiene

$$[2] \quad \frac{a}{p} - \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}.$$

III. *Relación entre la magnitud de la imagen y la del objeto.* — Resulta :

$$[3] \quad \frac{i}{o} = \frac{p'}{p}.$$

Las fórmulas [2] y [3], discutidas, conducen a los mismos resultados que los experimentos y construcciones geométricas.

546. **Fórmulas generales de las lentes.** — 1º Si se trata de establecer la relación entre la distancia del objeto y la de la imagen, en todos los casos posibles (lente convergente o divergente, objeto real o virtual, imagen real o virtual), se llega a la siguiente conclusión :

La fórmula que corresponde a un caso dado se deduce de la fórmula $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$, conservando el signo + para una magnitud correspondiente a un punto real, y reemplazando el signo + por el signo - en una magnitud correspondiente a un punto virtual.

Así, la fórmula de las lentes divergentes es, en el caso de un objeto virtual colocado entre la lente y el plano focal :

$$-\frac{1}{p} = \frac{1}{p'} = -\frac{1}{f}.$$

Y, en todos los casos, resulta :

$$\frac{i}{o} = \frac{p'}{p}.$$

547. **Combinaciones de lentes delgadas.** — **Teorema de las convergencias.** — *Si se adhieren unas a otras varias lentes infinitamente delgadas, convergentes o divergentes, el sistema formado equivale a una lente única, cuya convergencia es la suma algébrica de las convergencias de las lentes que constituyen el sistema.*

Por ejemplo, si se unen una lente convergente de 2 dioptrías ($f = 50$ cm.) y otra convergente de 3 dioptrías ($f' = 33,33$ cm.) se obtiene un sistema cuya convergencia es 5 dioptrías (distancia focal

20 cm.), En general, para la distancia focal φ del sistema, tenemos.

$$[1] \quad \frac{1}{\varphi} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f'}$$

Lo mismo sucede si se unen dos lentes divergentes.

De igual manera, si se unen una lente convergente, de distancia focal f , y una lente divergente, de distancia focal f' , el sistema será también convergente si la distancia focal de la lente convergente es menor que la de la lente divergente. En caso contrario, es divergente.

En ambos casos, la convergencia del sistema se obtiene efectuando la diferencia entre las convergencias de las dos lentes.

Así : una lente convergente de 10 dioptrías ($f = 10$ cm.), unida a una lente divergente de $- 8$ dioptrías ($f' = 12,5$ cm.) forman un sistema convergente de 2 dioptrías ($\varphi = 50$ cm.).

Al contrario, una lente convergente de 4 dioptrías unida a una lente divergente de $- 6$ dioptrías forman un sistema divergente de $- 2$ dioptrías.

La fórmula [1] se aplica también a este caso, a condición de considerar la convergencia de la lente divergente como negativa. El sistema será convergente o divergente según que el valor hallado para φ sea positivo o negativo.

OBSERVACIÓN. — Si se unen una lente convergente y otra divergente del mismo número de dioptrías, el sistema tiene convergencia nula, esto es, una distancia focal infinita. Un rayo paralelo al eje principal sale del sistema todavía paralelo al eje principal : dicese que el sistema es *afocal*.

Demostración. — Supongamos una lente convergente de distancia focal f y de foco F (fig. 576). Cuando recibe rayos paralelos al eje principal, estos rayos convergen en F; pero, si se adhiere a esta lente una segunda lente convergente de distancia focal f' , el radio IF' se vuelve a acercarse al eje y lo corta en Φ , que es el foco del sistema.

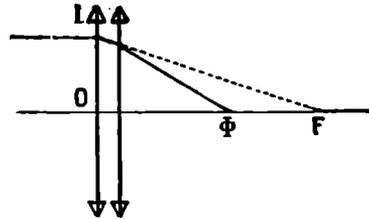


Fig. 576.

Si las lentes son delgadas, puede admitirse que el centro óptico de la segunda coincide con el de la primera. En este caso, en la segunda, F' funciona como un objeto virtual cuya imagen real es Φ . Por lo tanto, se aplicará la fórmula :

$$-\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f'}, \quad \text{haciendo a} \quad p = f, \quad p' = \varphi, \quad f = f'$$

Luego :
$$-\frac{1}{f} + \frac{1}{\varphi} = \frac{1}{f'}; \quad \text{de donde} \quad \frac{1}{\varphi} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f'}$$

Examinando los diversos casos particulares de combinaciones de dos lentes, se demuestra que esta fórmula es general con los convenios establecidos anteriormente.

En fin, el resultado se generaliza fácilmente en esta forma : si a un sistema de dos lentes de convergencia $\frac{1}{\varphi} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f'}$, se añade una tercera lente de distancia focal f'' , se obtiene un sistema de convergencia $\frac{1}{\Phi}$ tal, que

$$\frac{1}{\Phi} = \frac{1}{\varphi} + \frac{1}{f''} = \frac{1}{f} + \frac{1}{f'} + \frac{1}{f''}$$

548. **Determinación de la distancia focal de una lente divergente.** — Para medir la distancia focal de una lente divergente, se la asocia a una lente convergente de bastante potencia para que el conjunto forme un sistema convergente. Determináse la distancia focal φ del conjunto y la distancia focal f de la lente convergente sola. La distancia focal de la lente divergente (f' en valor absoluto) satisfará a la relación

$$\frac{1}{\varphi} = \frac{1}{f} - \frac{1}{f'}. \quad \text{Luego :} \quad \frac{1}{f'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{\varphi}.$$

De donde se saca el valor de f' :

$$f' = \frac{f\varphi}{\varphi - f}.$$

549. **Lentes gruesas.** — En el caso de que las lentes no sean sumamente delgadas, no se puede aplicar la teoría aproximada. Entonces se demuestran los resultados siguientes :

1º *Focos y planos conjugados.* — Cuando sólo se consideran rayos *centrales*, todos los rayos emanados de un punto luminoso van, después de refracción por la lente, a pasar por un foco conjugado real o virtual, y los puntos de un plano perpendicular al eje tienen sus imágenes en un plano también perpendicular al eje.

Lo mismo que la lente delgada, la gruesa tiene dos focos principales dotados de las mismas propiedades.

2º *Centro óptico; puntos nodales.* — Una lente gruesa tiene siempre un *centro óptico*.

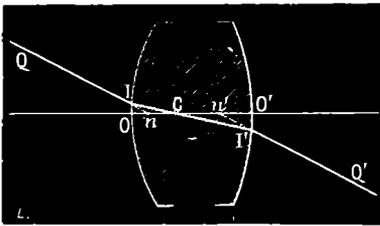


Fig. 577.

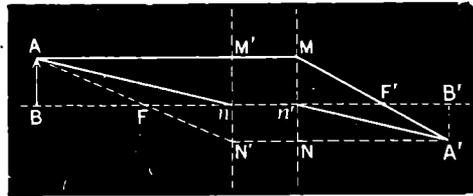


Fig. 578.

Consideremos un rayo incidente QI (fig. 577) que produzca un rayo refractado I' que pase por el centro óptico c : el rayo emergente correspondiente I'Q' es, como ya sabemos, paralelo a QI. Las direcciones de estos rayos cortan el eje en los puntos n, n' . Se demuestra que n, n' son *fixos* para cualquier par de rayos paralelos tales como QI, I'Q'. Estos dos puntos n, n' se llaman los *puntos nodales*. Según lo expuesto, su propiedad es la siguiente :

Si un rayo incide sobre la lente dirigiéndose hacia el primer punto nodal n , la dirección del rayo emergente pasará por n' y será paralelo al rayo incidente.

3º *Planos principales.* — Si la lente tiene sus dos caras bañadas por el mismo medio, los planos trazados por los puntos nodales perpendicularmente al eje principal (fig. 578), tienen la propiedad siguiente :

Todo punto M situado en uno de estos planos tiene su imagen en el otro en M', del mismo lado y a igual distancia del eje principal.

Estos planos se llaman *planos principales*. Hay que añadir que los focos F y F' de la lente se hallan en puntos tales como $nF = n'F'$. Esta distancia nF es la distancia focal de la lente.

4º *Construcción de la imagen de un objeto.* — Sea un objeto AB perpendicular al eje principal.

Tracemos el rayo AM paralelo al eje principal (fig. 578), pasando este rayo por el punto M', el emergente correspondiente pasará por la imagen de M M', y además por el foco F'.

Tracemos el rayo An, el emergente correspondiente pasará por n' y saldrá paralelamente a An.

Los dos rayos emergentes así determinados se encuentran en A', que es la imagen de A, y A'B', perpendicular al eje, es la imagen de AB.

Se pueden repetir construcciones análogas en todos los casos particulares y obtener resultados enteramente análogos a los de las lentes delgadas, en cuanto a la distancia, magnitud, dirección, realidad o virtualidad de la imagen. Las mismas fórmulas son aplicables, a condición de contar las distancias p y p' del objeto y de su imagen a partir de los puntos nodales.

OBSERVACIÓN. — Las construcciones hechas en el caso de las lentes delgadas pueden ser consideradas como casos particulares de las lentes gruesas. Se puede decir, en efecto, que en una lente delgada los dos planos principales se confunden en el plano por el que se reemplaza la lente, y que los dos puntos nodales se confunden con el centro óptico.

550. **Sistemas dióptricos centrados.** — El *sistema dióptrico centrado* se compone de una serie de medios transparentes separados por dos superficies esféricas, cuyos centros se hallan en la misma recta, llamada *eje del sistema*.

Se demuestra que semejante sistema tiene dos focos, dos planos principales y dos puntos nodales, como una lente gruesa, y pueden utilizarse estos elementos en la construcción de la imagen de un objeto luminoso.

La mayor parte de los instrumentos de óptica constituyen sistemas dióptricos centrados, a los que se pueden aplicar estas observaciones.

551. **Defectos de las lentes.** — 1º *Aberración de esfericidad.* — *Aplanelismo.* Un haz luminoso que incide sobre una lente se refracta como si incidiera sobre un prisma A' cuyo ángulo es variable y crece desde el eje, donde es máximo. De manera que los rayos periféricos son más desviados que los centrales (fig. 579) y el foco G' , está más cerca de la lente que el foco principal F' de los rayos centrales, único que hasta aquí hemos considerado. He ahí en qué consiste la *aberración de esfericidad* en las lentes.

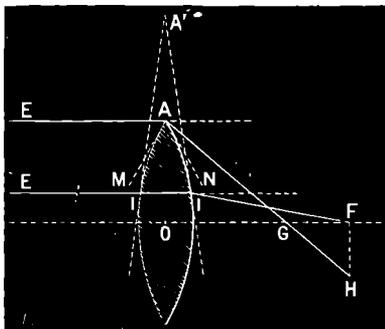


Fig. 579.

No sólo se produce con los rayos paralelos, sino también con los divergentes, o convergentes; pero no hay interés en considerar más que la primera, llamada a veces *aberración principal*. De este fenómeno resulta que la imagen de un punto luminoso muy distante no es un punto luminoso único. Por ejemplo, si el punto está al infinito en la dirección del eje y si se coloca una pantalla en F se obtiene un círculo luminoso de radio FH . Ocurriendo lo mismo con cada punto del objeto, no se puede obtener más que una *imagen confusa* de éste.

La distancia FG entre los dos focos principales se llama *aberración longitudinal principal*; la distancia FH es la *aberración transversal principal*.

Aplanelismo. — La experimentación prueba que si se reúne una segunda lente a la primera, los dos focos G' y F' se acercan a ésta, y F' más que G' , de ahí resulta que la aberración disminuye por la interposición de una lente suplementaria. Eligiéndolo de modo conveniente, hasta se logra suprimir por entero dicho defecto; así se produce el

...

aplanetismo del sistema convergente, y la lente compuesta se denomina *aplanética*.

Lente de aberración mínima. — No es posible obtener el aplanetismo con una lente única; pero una elección oportuna de los radios de curvatura puede reducir la aberración a un *minimum*. Este *minimum* se obtiene, para una lente de *convexa*, cuando el radio de curvatura de la segunda cara es seis veces mayor que el de la primera.

Si se volviera una lente de esta clase, su aberración sería *tres veces* mayor; así se comprende el inconveniente que existe en *volver los vidrios* en los instrumentos de óptica.

Uso de los diafragmas. — Se puede atenuar la aberración de las lentes ordinarias colocando delante de su superficie diafragmas taladrados por una abertura central: de esta manera pasan los rayos cercanos al centro y se interceptan los que tienden a refractarse hacia los bordes. Así se realiza más o menos el caso de los rayos centrales y se evita la aberración.

2º *Astigmatismo.* — Si una lente recibe un haz estrecho de rayos *oblicuos* que proceden de un punto luminoso, los rayos, en lugar de reunirse en una imagen puntual, cortan a pequeñas rectas perpendiculares entre sí, colocadas a distancias desiguales de la lente y que se denominan *rectas focales*. Este defecto se llama *astigmatismo*. Se suprime recibiendo únicamente en la lente los rayos que se apartan poco del eje principal.

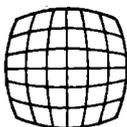


Fig. 580.

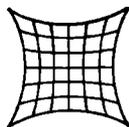


Fig. 581.

3º *Curvatura de las imágenes.* — La imagen de un objeto plano no es perfectamente plana; de modo que no puede proyectarse con perfecta claridad en una pantalla plana.

4º *Distorsión.* — Si por una lente se proyecta la imagen de un cuadrículado trazado en una lámina de vidrio, se ve que las imágenes de sus rectas son curvas y que no tienen igual curvatura.

Este defecto se llama *distorsión*. Según la orientación de los rayos, puede obtenerse, ya la apariencia de la figura 580 (*distorsión abarillada*), ya la de la figura 581 (*distorsión en media luna*). La distorsión desaparece si los rayos de luz pasan junto al centro óptico de la lente.

5º *Aberración cromática o aberración de refrangibilidad.* — Más adelante estudiaremos la aberración cromática de las lentes, a consecuencia de la cual éstas producen una imagen poco clara e irisada por los bordes, de un objeto blanco.

552. *Uso de las lentes convergentes en los proyectores.* — *Lentes de escalones.* — Si se colocase una procedencia luminosa reducida a un punto en el foco de una lente convergente, perfectamente aplanetada, el haz de rayos que emergen de la lente sería perfectamente cilíndrico y la iluminación que pudiera producir no disminuiría, según la distancia, sino a causa de la absorción de la luz por la atmósfera. Pero si las lentes no son aplanetadas, el haz es más o menos divergente.

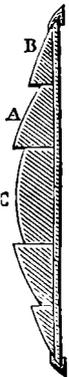


Fig. 582.

Uso de las lentes de escalones. — Obtiene un aplanetismo muy suficiente en la práctica por el uso de las lentes llamadas *de escalones*. Estas lentes de escalones fueron ideadas por Buffon; pero las perfeccionó Fresnel.

Están formadas por una lente plano-convexa C (fig. 582) incrustada en una serie de anillos de vidrio A, B... igualmente plano-convexos. Las caras convexas de cada uno de estos anillos tienen una curvatura tal, que sus diversos focos van a formar en el de la lente.

553. *Faros.* — Las lentes de Fresnel constituyen el órgano esencial de los faros actuales (fig. 583). La luz o sea el foco luminoso está colocado en el foco principal de una lente de escalones, de modo que el haz emergente es paralelo. Para que todos los puntos del horizonte sean alumbrados sucesivamente, la lente se mueve alrededor de la lámpara, por medio de un mecanismo de relojería. De esto resulta que para un mismo punto del horizonte hay sucesivamente aparición y eclipse de luz a intervalos iguales. Estos eclipses intermitentes sirven para distinguir los faros unos de otros o bien de una luz accidental.

Se dice que el faro es *catadióptrico* (fig. 583) cuando se utilizan al mismo tiempo la

reflexión y la refracción para aumentar su fuerza. En torno de la lente propiamente dicha se ve una serie de prismas de reflexión total, dispuestos en abanico, que reflejan horizontalmente los rayos luminosos más divergentes, aumentando así el haz.

En cuanto al foco de luz empleado es muy variable. En otro tiempo (y aun hoy en algunos faros) se empleaba una lámpara grande de aceite, de cuatro a cinco mechas concéntricas. Después se reemplazó el aceite por el petróleo y luego se recurrió al arco voltaico. En estos últimos años se ha utilizado la luz producida por la combustión del gas de aceite, y por fin la incandescencia de una mangueta Auer, empleando el gas o el vapor de petróleo. Este está contenido en un depósito P (fig. 583) de donde sale empujado por el aire comprimido de otro depósito A, dilatado en un regulador R, sistema Fournier (201). El petróleo llega por el tubo T al mechero B, donde se vaporiza por el calor del mechero y sale en estado de vapor que arde manteniendo la incandescencia de la mangueta.

Faros de automóviles. — En los faros de automóviles el foco luminoso (mechero de acetileno, lámpara eléctrica) está colocado delante de una lente de Fresnel, de uno o dos escalones. Detrás del foco hay otro espejo parabólico.

554. *Fabricación de las superficies planas y esféricas.* — Los medios empleados para fabricar las lentes y los espejos esféricos de grandes dimensiones varían según los constructores; por eso sólo indicaremos el medio general seguido para tallar los vidrios. Supongamos primeramente que se trata de hacer una superficie esférica de radio dado. Se fabrican primero dos piezas de cobre: el *bacinete* que presenta en

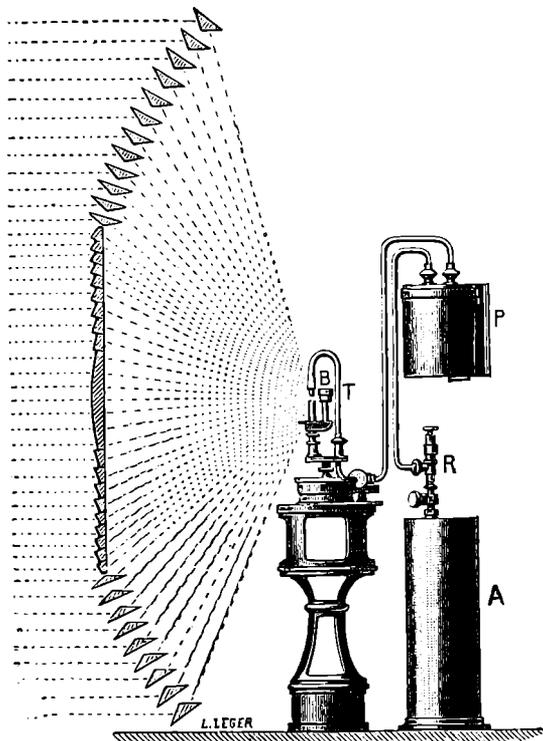


Fig. 583.

huevo la superficie esférica que se desea, y la *bala* que la presenta en relieve. Para esto se desbastan primero los dos objetos en un torno ordinario, después se les cubre de esmeril en polvo y se frota uno contra otro en un torno especial. Se puede ver la perfección de la curvatura obtenida sirviéndose de un *gálibo*, que es un disco de acero o de vidrio cuyo radio de curvatura es exactamente igual al de la superficie que se desea. Aplicando este gálibo al bacinete se ven las irregularidades que debe corregir el obrero. Cuando el gálibo encaja perfectamente en todos los planos diametrales del bacinete y cuando casan perfectamente las superficies de la bala y el bacinete, están bien hechas las dos superficies esféricas.

Para tallar el trozo de vidrio se le desbasta previamente. Cuando se quiere que la cara sea convexa, se la frota en un bacinete de hierro colado puesto en un torno, conteniendo esmeril de grano cada vez más fino. Después se le talla en el bacinete de cobre con esmeril cada vez más fino. Como la talla desbasta al mismo tiempo el vidrio y el bacinete, poco a poco se obtiene la esfericidad perfecta de uno y otro. Si se quiere fabricar una superficie cóncava, se talla el trozo de vidrio en la bala, que contiene el relieve.

En cuanto a las superficies planas, se tallan sirviéndose de planchas de cobre. Para obtener su planicidad se frota una contra otra interponiendo polvos de esmeril. Al fin de la operación es preciso que la superficie que sirve para tallar la lente, ajuste exactamente con las otras.

Como la operación del esmeril quita el pulimento a las superficies, se las pule uniendo perfectamente al instrumento, sea al bacinete, sea a la bala, empleado para la talla, un

papel especial que no pueda rayar el vidrio. Este papel está cubierto de rojo de Inglaterra (óxidos de hierro) y mientras que el molde da vueltas en el torno se le aplica la cara que se quiere pulir.

CAPÍTULO VII

EL OJO HUMANO. — VISIÓN*

555. **Estructura del ojo humano.** — El globo ocular (fig. 584), órgano de la visión, se compone de una envoltura formada de varias membranas sobrepuestas y de un contenido más o menos líquido.

La envoltura exterior es la *esclerótica a*, membrana blanca muy resistente, que presenta por delante una abertura, casi circular, en la cual

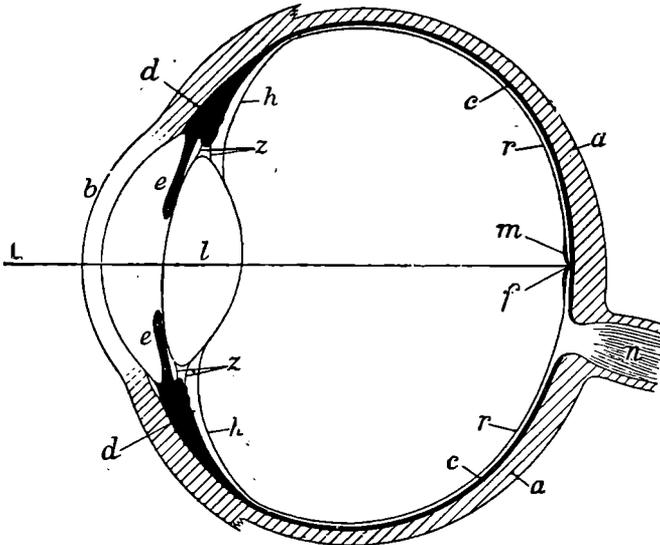


Fig. 584.

está incrustada la *córnea b*. Ésta es transparente y tiene la forma de un menisco convexo-cóncavo, de curvatura mucho mayor que la de la esclerótica.

La superficie interna de la esclerótica está tapizada por la *coroides c*, membrana muy fina, llena de vasos sanguíneos; por delante, se abulla y toma la forma de un anillo de sección triangular llamado *cuerpo ciliar d*. Anatómicamente, este cuerpo se divide en dos partes: una externa, el *músculo ciliar*, compuesto de fibras longitudinales, y otra

* Este capítulo ha sido redactado en colaboración con el doctor Mr. Tscherning.

interna formando una serie de pliegues que avanzan hacia el eje del ojo. A estos pliegues se les da el nombre de *procesos ciliares*. El cuerpo ciliar sirve de punto de inserción al *iris e*, membrana que tiene en el centro una abertura circular, la *pupila*, por donde entran los rayos luminosos en el ojo. El tamaño de la pupila no es igual en todas las personas; por influencia de la luz, o cuando se hacen esfuerzos para ver de cerca, se contrae. La superficie interna de la coroides, del cuerpo ciliar y del iris está cubierta de una membrana, compuesta de celdillas que contienen un pigmento negro, la cual sirve para proteger la parte interna del ojo contra la luz que haya atravesado las membranas.

En su parte posterior e interna, la esclerótica tiene una abertura que da paso al *nervio óptico n*, que se extiende, dentro del ojo, por la *retinaria r*, fina membrana transparente, de estructura muy compleja, que tapiza el interior de la envoltura del ojo. La retina es la que recibe la impresión de la luz y la transmite por el nervio óptico al cerebro, donde produce la sensación luminosa. No es sólo la luz la que produce estas sensaciones: una presión en el ojo, o una corriente eléctrica producen también sensaciones luminosas, además, toda irritación de la retina y del nervio óptico no puede producir más que la sensación luminosa. La parte más sensible de la retina es una mancha amarilla *m*, la *mácula lutea*, situada enfrente de la pupila, y el máximo de sensibilidad está en el centro de la mancha designada con el nombre de *fovea centralis f*.

Todavía no se conoce de qué manera obra la luz en la retina. Sólo se sabe que la retina contiene una substancia roja, que se descolora por la acción de la luz (*Boll*) y que algunos de sus elementos se contraen en la luz y se prolongan en la obscuridad (*Genderen Stort*).

El *crystalino l*, que está suspendido de los procesos ciliares por medio de las fibras de la *zónula de Zeim*, divide la cavidad ocular en dos partes: el humor acuoso llena el pequeño espacio que está delante; el iris le divide en dos cámaras, una anterior y otra posterior, que están en comunicación por la pupila. El espacio grande detrás del cristalino está ocupado por el *cuerpo vítreo*, masa gelatinosa transparente, cubierta por la membrana *hialoides h*, que tapiza la superficie posterior del cristalino, así como toda la superficie interna de la retina.

El *crystalino* es un cuerpo transparente cuya forma es semejante a la de una lente. La cara anterior es menos convexa que la posterior. El cristalino se compone de laminillas *aproximadamente* concéntricas. Las capas superficiales tienen una consistencia algo parecida a la de una solución de goma espesa; pero esta consistencia aumenta hacia el centro hasta formar un núcleo bastante sólido. Todo está contenido en una cápsula transparente. Gracias a esta estructura, el cristalino posee cierto grado de elasticidad; de modo que puede cambiar de forma por una presión o tracción exterior y volver a su forma normal tan pronto como cesa la acción. El índice de refracción de la masa cristalina aumenta hacia el centro, al mismo tiempo que la consistencia. Se designa con el nombre de *índice total* del cristalino el índice de una lente imaginaria de la misma forma y distancia focal que el cristalino.

Por causa de enfermedad, el cristalino puede volverse opaco, resultando entonces la ceguera conocida con el nombre de *catarata*, cuya operación consiste en la extracción del cristalino opaco.

Constantes ópticas del ojo. — Los elementos geométricos y ópticos del ojo son los siguientes :

Radio de curvatura de la córnea, superficie anterior.	8 mm.
— — — — — posterior	6,5 —
— del cristalino, superficie anterior.	10 —
— — — — — posterior.	6 —
Distancia de la superficie anterior de la córnea a la superficie anterior del cristalino.	3,5 —
Espesor del cristalino.	3,5 mm.
Eje ocular	23 —
Índice del humor acuoso y del cuerpo vitreo.	1,3375
Índice total del cristalino.	1.437

556. Mecanismo de la visión. — El sistema óptico del ojo funciona como una lente convergente. A consecuencia de la acción refringente de la córnea y del cristalino, fórmase en la retina una pequeña imagen $A'P'$ (fig. 585), invertida y real de un objeto exterior AP . Esta imagen es la que sirve a la visión. Cuando es clara, la visión es precisa.

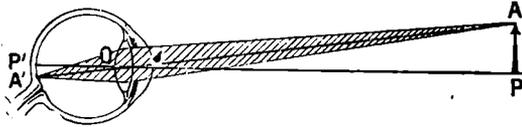


Fig. 585.

El ojo tiene un centro óptico O situado en el cristalino, muy próximo a su superficie posterior, a 16 milímetros de distancia de la retina. La imagen A' de un punto-objeto A está, pues, situada en la prolongación de la recta AO .

557. Línea visual. — **Campo de visión neta.** — **Diámetro aparente de un objeto.** — Se da el nombre de *línea visual* a la recta PP' (fig. 585) que une el punto que se mira á la fovea. Para ver claramente un objeto, es preciso que su imagen se produzca en la fovea cuyo centro es P' . La recta $P'O$ debe, por tanto, dirigirse al objeto.

Campo de visión neta. — Como la fovea tiene dimensiones muy pequeñas, no se puede ver claramente sino los puntos situados en un

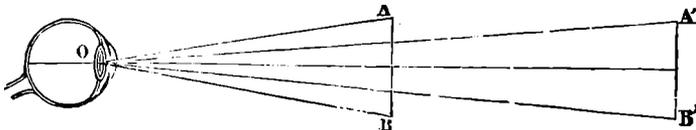


Fig. 586.

cono de vértice O y de ángulo en el vértice muy pequeño. Este cono se denomina *campo de visión neta* *. La pequeñez del campo de visión neta se compensa por la facilidad con que el ojo se mueve en su órbita. Así puede ver *sucesivamente*, en muy poco tiempo, puntos muy separados unos de otros.

* El campo total de la visión es, por el contrario, muy extenso (570).

Diámetro aparente de un objeto. — Es el ángulo AOP (fig. 585) formado por las rectas que pasan por el centro óptico del ojo y por los puntos extremos del objeto. Es fácil ver en la figura, que la imagen de la retina es de tamaño proporcional a este ángulo; por eso, éste determina la magnitud *aparente* del objeto. Llámase también *ángulo visual*. Este ángulo varía en razón directa de la magnitud del objeto y en razón inversa de su distancia (fig. 586).

558. **Acomodación.** — Si se coloca un velo a 30 centímetros de la vista, se puede ver distintamente; ya las mallas del velo, ya los objetos lejanos : pero cuando éstos se ven claramente, las mallas aparecen confusas y viceversa. El ojo de constitución normal ve claramente los objetos situados a una distancia infinita; luego su plano focal está situado sobre la retina. Si el ojo no pudiera modificarse espontáneamente, la imagen de objetos más próximos se verificaría más allá del plano focal, es decir más allá de la retina y ya no se verían claramente. Este experimento demuestra que el ojo posee la facultad de ponerse en foco según las distancias : a este enfocamiento se le ha dado el nombre de *acomodación*. Consiste en traer a la retina la imagen de los objetos diversamente alejados. El cambio se debe a una modificación en la curvatura del cristalino, que se vuelve más abombado y por tanto más convergente, cuando se miran puntos cercanos (561).

El punto más lejano que la vista puede distinguir se llama *punctum remotum*.

La acomodación para el *remótum* correspondè al estado de reposo del ojo; para ver objetos más cercanos se necesita cierto esfuerzo.

El punto más cercano que se puede ver claramente se llama *punctum proximum*. Su distancia al centro óptico del ojo se llama *distancia mínima de visión clara*. Es igual a 15 cm para un ojo normal.

559. **Emetropia, miopia, hipermetropia.** — El ojo normal, llamado *emétrope*, tiene su *remótum* situado al infinito; por consiguiente ve sin acomodación los objetos más remotos y aun los que están a unos quince metros de distancia; pero, para distancias más cortas, el ojo tiene que recurrir á la *acomodación*; pues, de otro modo, las imágenes se formarían detrás de la retina y no las vería claramente.

Si el *remótum* está situado a una distancia finita, el ojo se llama *miope*. Esta anomalía proviene de que el eje del ojo es muy largo, de modo que la retina está situada mas allá del foco principal del sistema refringente del ojo (fig. 587 A). La imagen de los objetos al infinito se forma entonces delante de la retina; cuando se acerca el objeto mirado, su imagen se acerca á la retina, y la alcanza cuando el objeto está en el *remótum* : entonces, la visión es neta. Para distancias más pequeñas, hasta el *proximum*, el ojo debe acomodarse para ver clara-

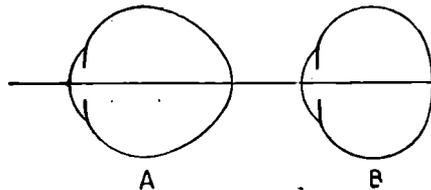


Fig. 587.

mente la imagen, que, de lo contrario, se formaría detrás de la retina*.

Corrigese la miopia colocando delante del ojo una *lente divergente* cuyo foco está en el *remótum* R (fig. 588). En efecto, un haz de rayos

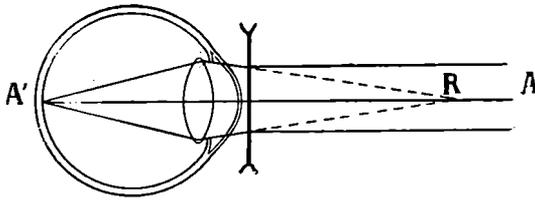


Fig. 588.

paralelos, procedentes del punto A al infinito, que, sin la lente, serian refractados delante de la retina, es transformado por la lente en un haz que diverge del punto R. Todo ocurre como si el punto-objeto estuviera en R, y

entonces el ojo hace converger los rayos en el punto A' de la retina. De modo que, mediante la lente, tiene la misma propiedad que un ojo normal.

Hipermetropia. — En la hipermetropia el ojo es demasiado corto

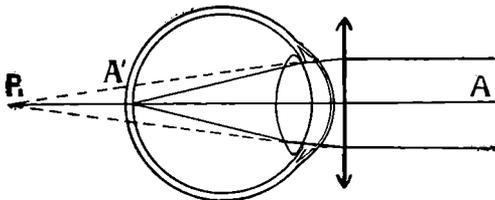


Fig. 589.

(fig 587, R). Las personas afectadas de esta anomalía no pueden distinguir los objetos lejanos sin realizar un esfuerzo de acomodación, porque, de lo contrario, las imágenes se formarían detrás de la retina. Esta anomalía se corrige por medio de lentes

convergentes. En efecto, para que el ojo concentre un haz de rayos en un punto de su retina, es preciso que este haz converja ya hacia un punto R (fig. 589) situado detrás de la retina, y que es un *remótum virtual*. La lente de corrección debe tener su foco en el *remótum*. Entonces transforma los rayos paralelos procedentes de un punto A al infinito en rayos convergentes en R, que el ojo concentra en A' en la retina sin acomodación.

La hipermetropia es, generalmente, congénita; pero los mayores grados se encuentran en los casos en que se ha sacado el cristalino (afaquia).

560. *Presbicia.* — Como la ligereza del cristalino disminuye con la edad, la distancia mínima de visión clara aumenta cada vez más: a la edad de cuarenta y cinco años, es mayor que la distancia a que ordina-

* El Dr. Javal hace una distinción entre la miopia *leve* en que el *remótum* está situado más allá de 33 centímetros, la miopia *media* en que el *remótum* está situado entre 33 y 10 centímetros y la miopia *fuerte* en que la distancia máxima a que se puede ver netamente no pasa de 10 centímetros. La miopia está más extendida entre las clases letradas de la sociedad. El Dr. Tscherning ha encontrado 32 por 100 de miopes entre estudiantes, 2 por 100 entre labradores; pero hay que notar que esta diferencia sólo existe para los grados leves y medios de la miopia, que deben ser considerados como el resultado de una especie de adaptación del ojo a su trabajo. La miopia fuerte, que también es frecuente en las clases bajas de la sociedad, es, por el contrario, una verdadera enfermedad, que, generalmente, presenta graves peligros.

riamente se lee; este estado se designa con el nombre de *presbicia*. Se remedia con lentes convergentes. Es preciso que esta lente dé de un objeto A (fig. 590) colocado a unos 15 cm. del ojo (distancia mínima de visión clara de un ojo normal) una imagen virtual situada en el *punctum proximum* P del ojo presbita. El presbita, para ver objetos lejanos, tiene que quitarse los lentes.

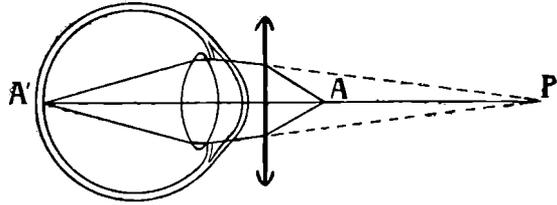


Fig. 590.

Los miopes se vuelven presbíta; pero este defecto no es grave, porque es claro que personas cuyo *remótum* está situado a 33 centímetros, y aun más cerca, podrían leer aunque se redujera a cero la acomodación. En cambio, los hipermetropes se vuelven pronto presbíta.

561. **Mecanismo de la acomodación.** — **Imágenes de Purkinje.** — La cuestión de saber los medios según los cuales se pone en foco el ojo para los objetos cercanos se resolvió con el estudio de las imágenes de *Purkinje*.

Imágenes de Purkinje. — Cada vez que la luz encuentra una superficie refringente, una parte se refleja. Como el ojo posee cuatro superficies refringentes, de ahí que debemos tener cuatro imágenes de reflexión (fig. 591). Estas imágenes se conocen con el nombre de *imágenes de Purkinje*, y es muy fácil observarlas presentando una llama de bujía delante del ojo. Las imágenes de las tres primeras superficies son virtuales y rectas; la de la superficie posterior del cristalino es real e invertida. La imagen de la superficie anterior de la córnea es mucho más brillante que las otras tres.

Oftalmómetro de Javal. — *Oftalmofacómetro de Tscherning.* — Las imágenes de *Purkinje* son de poca utilidad para la visión; pero desempeñan un gran papel en el estudio de la forma de las superficies. *Javal* y *Schietz* han construido el *oftalmómetro* para medir la córnea, y *Tscherning* el *oftalmofacómetro* para medir el cristalino por medio de esas imágenes.

Cuando se ponen delante de la vista dos llamas de modo que cada superficie forme dos

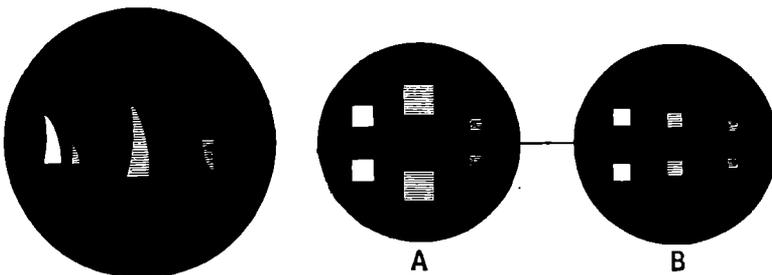


Fig. 591.

mágenes de reflexión, se ven las de la superficie anterior del cristalino acercarse, disminuyendo (fig. 591 A y B), señal evidente de que la superficie se vuelve más convexa. En la superficie posterior, se verifica una deformación análoga, pero no tan pronunciada. El cambio se verifica sin duda ninguna por una contracción del músculo ciliar.

562. **Aberración del ojo.** — La vista padece de *aberración cromática* (613). Si se mira a un punto luminoso lejano a través de un prisma de *flint*, se presenta en forma de un espectro lineal, pero se nota que no se puede ver distintamente los dos extremos a la vez. Casi todos ven el extremo rojo claramente, el extremo violado difusamente, porque los rayos violados se refractan mucho en el ojo. Por el contrario, con un vidrio divergente cóncavo se ve el extremo violado claramente y el rojo difusamente.

Lo más frecuente es que el ojo padezca de aberración de esfericidad, por ser los bordes del espacio pupilar más refringentes que el medio. Este defecto se descubre con el *aberroscopio* del Dr. *Tscherning*, formado por una lente planoconvexa, con una cuadrícula grabada en el lado plano. Mirando hacia un punto luminoso bastante lejano, a través de la lente, se ven las líneas de la cuadrícula curvas, dirigiendo su concavidad hacia la periferia.

563. **Astigmatismo.** — En general, ni la aberración cromática, ni la esfericidad causan daño a la vista; pero existe otra anomalía, el *astigmatismo*, que suele disminuir la agudeza de la vista. Consiste en que la refringencia no es igual en todos los meridianos: el meridiano vertical es casi siempre el más refringente. Las personas que padecen de esta anomalía no pueden ver claramente líneas horizontales y verticales a la vez. La fig. 592 muestra, en B, cómo un astigmata ve la figura A. Para los astigmatas, una estrella aparece en forma de una pequeña línea o de una elipse.

El astigmatismo del ojo humano fué descubierto por *Th. Young* en 1801. Parece que es muy raro que haya una sola persona exenta completamente de esta anomalía. Este defecto se corrige con vidrios tallados en forma cilíndrica. Estos vidrios no surten efecto en el meridiano que es paralelo al eje del cilindro, sino en la dirección perpendicular. Este defecto reside generalmente en la córnea: por eso, es muy útil, para descubrirlo, el oftalmómetro de Javal.

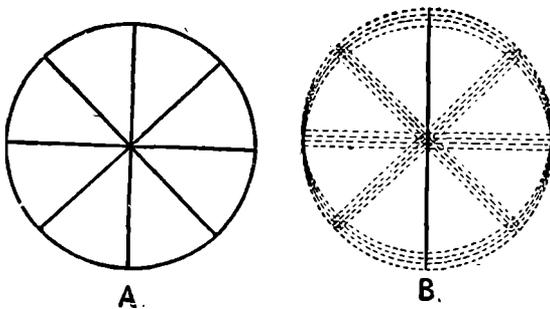


Fig. 592.

564. **Oftalmoscopio.** — La retina y la coroides absorben la mayor parte de la luz que entra en el ojo; pero otra parte se refleja. Al salir esta luz del ojo, sigue el mismo camino que al entrar. Si se mira a una llama, la luz reflejada por el fondo del ojo vuelve hacia ella; de modo que si un observador pudiera hacer coincidir su vista con la llama, vería la pupila luminosa del sujeto observado. El

oftalmoscopio inventado por *Helmholtz*, en 1851, realiza esta condición. Este instrumento es un espejo cóncavo o plano que tiene en su centro un agujero de unos 2 milímetros de diámetro (fig. 593).

El observador mira por ese agujero, proyectando a la vez la luz sobre el ojo que está

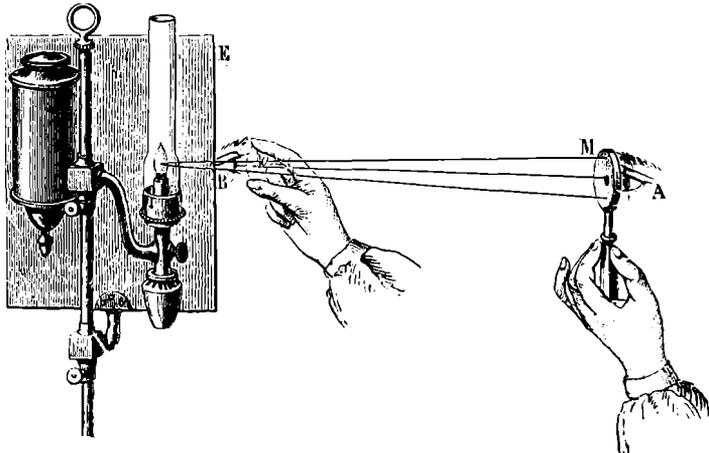


Fig. 593.

examinando. Entonces, la pupila aparece roja como la de un conejo blanco. Sin otra preparación, se pueden distinguir los detalles del fondo del ojo, colocándose cerca del sujeto, con tal que éste y el observador sean emétopes; pues rayos procedentes de un punto del fondo del ojo observado serán, al salir del ojo, paralelos, como si vinieran de

un punto muy lejano. Si el observado no es emétrope, hay que corregir su anomalía con el cristal adecuado. El cristal que permite ver claramente los detalles del fondo del ojo, indica también, el grado de miopía o de hipermetropía del observado.

565. **Agudeza visual.** — Se considera como normal al ojo que puede distinguir dos puntos separados por un intervalo correspondiente a un ángulo visual de un minuto. Para este examen se emplean generalmente letras colocadas a una distancia de 5 o 6 metros, cuyos trazos, así como sus intervalos, corresponden a un minuto. (Tablas de *Smellen.*) Conviene usar vidrios adecuados para corregir anomalías ópticas si las hubiere. No es raro que haya ojos cuya agudeza pase de este límite, que debe ser considerado como un *minimum*.

566. **Percepción de la claridad.** — El ojo puede distinguir entre dos objetos cuya claridad difiera $\frac{1}{100}$. Si los objetos son muy oscuros o muy brillantes, la diferencia debe ser mayor.

Mientras que podemos decidir muy bien si dos objetos presentan una diferencia de claridad o no, no tenemos ningún medio directo para medir la diferencia: no podemos decir si un objeto es dos, tres o cuatro veces más claro que otro.

Si los dos objetos son de diferente color, el juicio que formamos de su claridad es algo dudoso.

567. **Visión de los colores.** — Para la vista normal se puede reproducir cualquier color existente mezclando en proporciones convenientes tres colores espectrales, *rojo, verde y azul*. Por esta razón se dice que el ojo es *tricromata*.

Se han observado las anomalías siguientes de la visión de los colores: 1° La *trichromasia* anormal, descubierta por lord *Rayleigh* en 1880.

Las personas que padecen de esta anomalía pueden reproducir todos los colores mezclando los mismos tres colores que las personas normales; pero pecan de exceso de verde en sus mezclas. Así, la mezcla que les parece blanca, es verde, y la que consideramos como blanca les parece rosa.

2° La *dicromasia* o el *daltonismo*, así llamado por tener esta enfermedad el químico inglés *Dalton*. Los daltonianos no distinguen entre los colores rojos, amarillo y verde y pueden reproducir todos los colores que ven, mezclando dos colores solamente, por ejemplo el *verde* y el *azul*. De éstos hay que distinguir dos grupos: a unos les parece muy oscura, casi negra, la extremidad roja del espectro, resultando éste más corto: otros, por el contrario, ven el espectro en toda su longitud.

Un 5 por 100 de hombres padecen de daltonismo, mientras que esta anomalía es muy rara en las mujeres.

3° *Acromasia*. Hay personas que no distinguen ningún color, es decir, que padecen de *acromasia*. Esta anomalía es rarísima.

568. **Persistencia de la impresión luminosa.** — Si se hace girar rápidamente un carbón encendido, parece que forma un círculo luminoso, porque la impresión producida en un punto de la retina no tiene tiempo de desaparecer antes que vuelva la imagen de carbón. Si la velocidad es menos rápida, no se ve más que una fracción de la circunferencia, y si se disminuye más la velocidad, se ve el carbón en su forma verdadera, pero seguida a cierta distancia de una imagen azul que produce exactamente su forma, señal que una vez apagada la sensación vuelve a empezar cambiando de color. — El efecto del cinematógrafo (397) se funda en la persistencia de la impresión retiniana.

569. **Imágenes secundarias.** — 1° *Contraste sucesivo*. — Si se pone en una hoja blanca un pedazo de papel colorado y se le retira después de haberle mirado fijamente un rato, se ve en su sitio una mancha reproduciendo su forma, teñida del color complementario (642).

2° *Contraste simultáneo*. — Colocando dos colores uno al lado de otro, cada cual parece mezclado con el color complementario del otro. Colocando el color rojo al lado del anaranjado, el rojo tira a violado y el anaranjado a amarillo (*Cherreul*).

570. **Campo visual.** — Experimento de *Mariotte*. — Experimento de *Troxler*. — El campo visual, es decir, el espacio que la vista puede abarcar cuando mira a un punto dado, es muy grande; por fuera, alcanza hasta 180°; pero hacia los bordes la visión es muy difusa.

La región que corresponde a la entrada del nervio óptico es ciega, como lo prueba el experimento de *Mariotte*. Se marcan en una hoja de papel blanco dos manchas negras, colocadas en una línea horizontal, a unos 10 centímetros de distancia una de otra: acercando o alejando el papel mientras se está mirando el punto de la izquierda con el ojo derecho, se halla fácilmente un sitio donde es invisible el punto de la derecha, porque su imagen coincide con la entrada del nervio óptico.

El experimento de *Troxler* prueba que la retina se vuelve a veces insensible por causa de una impresión prolongada. Márquense unas cuantas manchas negras en una hoja de papel blanco y fíjese la vista en una de ellas; después de un rato, se verá, ya una, ya otra de las manchas aparecer y desaparecer al poco tiempo.

571. **Visión binocular.** — Cuando fijamos los dos ojos en un objeto, se forma una imagen en cada mácula, dirigiéndose hacia el mismo punto los dos ejes visuales de ambos ojos (fig. 594); lo mismo ocurre con otro objeto situado a la misma distancia que

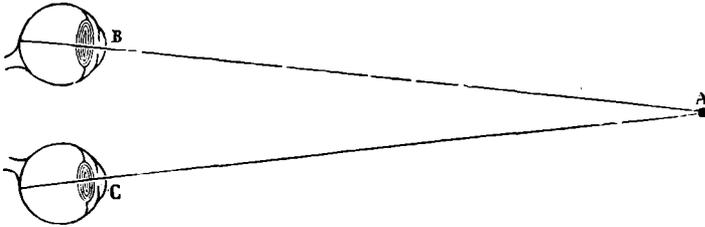


Fig. 594.

el primero. Pero si el segundo objeto se halla más lejos o más cerca se le ve doble. Si, por ejemplo, se colocan dos bujías en el plano medio del cuerpo, pero a diferente distancia, se ve simple la bujía que se está mirando, y la otra, doble. Apenas nos damos cuenta de esta *diplopia binocular* a causa de la superioridad de la mácula que hace que se fije la atención en el punto que se mira, y también, porque tenemos la costumbre de *suprimir* una de las imágenes, es decir, no fijarnos en ella. En el *estrabismo* las líneas visuales no se cruzan en el punto mirado; por consiguiente, los bisojos deberían ver las cosas dobles; pero, generalmente, suprimen la imagen del ojo más débil.

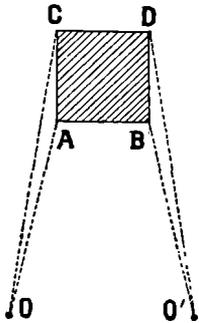


Fig. 595.

Sensación del relieve. — Las imágenes vistas de este modo por los dos ojos no son idénticas; pues la perspectiva no es la misma. Suponamos, por ejemplo, que se mira a un cubo figurado en proyección en ABCD (fig. 595), con los ojos colocados en O y O'. El ojo izquierdo O podrá ver la cara AC; pero no verá la BD. El ojo derecho, verá, al contrario, la cara BD y no la AC.

A esta diferencia de perspectiva, se debe la sensación del relieve. Esta sensación se suprime cerrando un ojo; en este caso, los objetos circundantes parecen pegados unos a otros.

Esta sensación del relieve se produce por medio de fotografías estereoscópicas (658).

572. **Apreciación de la distancia.** — Nuestra apreciación de la distancia de un objeto depende de gran número de factores.

Generalmente, nos sirven de guía objetos cuya magnitud conocemos. La imagen retiniana de un hombre lejano es muy pequeña; de ahí deducimos, no que sea un enano el que estamos viendo, sino que está muy lejos.

También puede guiarnos la posición recíproca de los objetos. Por eso se comprende que un objeto que oculta parte de otro, debe estar más cerca que éste.

En otros casos nos guiamos por la perspectiva aérea. La atmósfera jamás es enteramente transparente, y cuanto más densa es la capa que nos separa del objeto lejano, tanto más confuso se ve el objeto.

Para objetos cercanos, nos guiamos sobre todo por el grado de convergencia que se debe dar a las líneas visuales para que las imágenes del objeto se formen en las dos máculas, de modo que se le vea simple.

CAPÍTULO VIII

INSTRUMENTOS DE ÓPTICA

APARATOS DE PROYECCION.

573. **Aparatos de proyección.** — Principio. — Llámanse *aparatos de proyección* a los instrumentos de óptica destinados a proyectar en una pantalla blanca, en la cámara oscura, imágenes reales y ampliadas de pequeños objetos. Estos consisten ordinariamente en cuadros transparentes, pintados o fotografiados en cristal y muy iluminados.

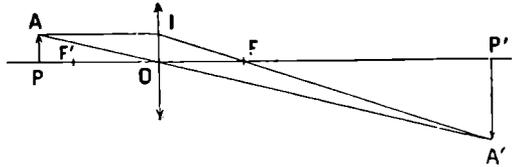


Fig. 596.

Tales aparatos son perfeccionamientos de la antigua linterna mágica. Se fundan en que si se coloca un objeto AP (fig. 596) algo más allá del plano focal-objeto de una lente convergente, la lente da una imagen, A'P' de él tanto más grande cuanto más convergente es la lente y cuanto más próximo al plano focal se halla el objeto. La distancia y la magnitud de la imagen aumentan rápidamente cuando el objeto se acerca al plano focal.

Se llama *ampliación lineal* a la relación que existe entre una dimensión lineal de la imagen y la dimensión correspondiente del objeto.

574. **Linternas de proyección.** — En el caso general, no se puede efectuar proyección sino por medio de una fuente de luz artificial, tal como la luz *Drummond** o la luz eléctrica. Para ello úsanse *linternas* o *aparatos de proyección*.

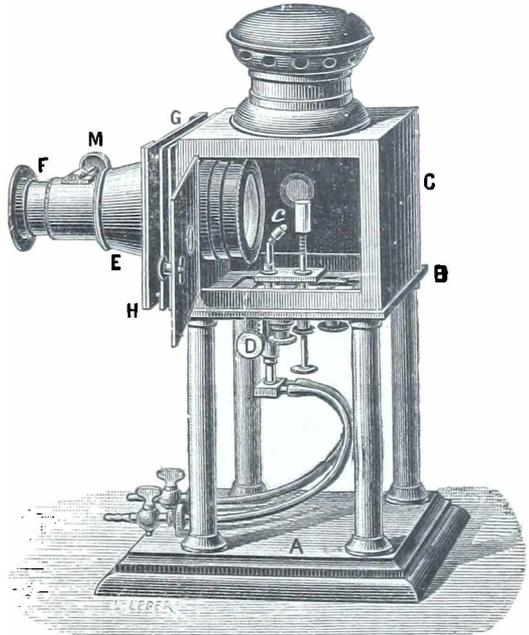


Fig. 597.

El sistema del soplete y del trozo de cal c (fig. 597), cuando se trata

* Sabemos que esta luz se obtiene por medio de una barra de cal o de magnesia, hecha incandescente por la llama de un soplete doble de oxígeno e hidrógeno.

de la luz Drummond, o el sistema de los dos carbones A (fig. 598), si se emplea el arco eléctrico, puede recibir, por medio de piñones y cremalleras, todos los movimientos posibles, de arriba abajo, de adelante atrás,

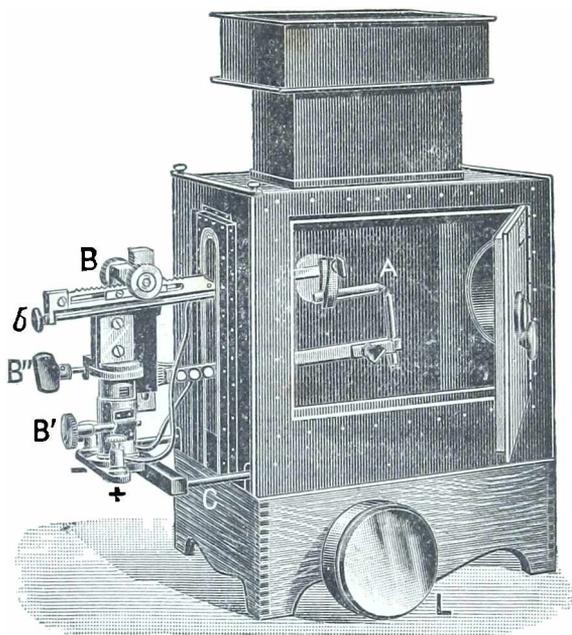


Fig. 598.

de derecha a izquierda; de modo a enfocar la fuente luminosa con relación a los sistemas refringentes de la linterna. En el caso del arco voltaico (fig. 598), los carbones que se gastan lentamente pueden ser llevados a distancia adecuada, bien con la mano, bien por un movimiento de cremallera B o por medio de un regulador. La figura 598 representa una *linterna eléctrica Richard*. En ella, el carbón positivo es horizontal y el negativo, vertical. En consecuencia, la luz emitida por el cráter positivo no se intercepta por nada. El botón *b* sirve para adelantar o atrasar el carbón positivo. El conjunto de los dos carbones se sube o baja mediante el botón *B'*. En fin, merced a un bastidor *C*, toda la lámpara puede avanzar o retroceder a voluntad.

Sea cual fuere la fuente luminosa que se emplee, los sistemas refringentes no varían. Hay dos: el *condensador de luz L* (fig. 598) y el objetivo situado en el extremo del *cono de proyección E* (fig. 599). El condensador concentra en el objeto la luz de la fuente. El objetivo está, en general, formado por dos lentes acromáticas *E* y *F*.

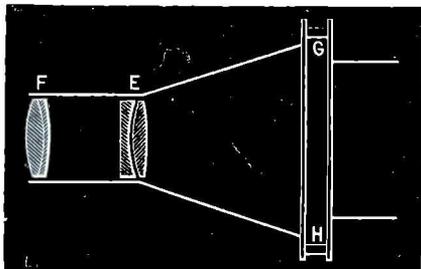


Fig. 599.

Para proyectar a variadas distancias, según la sala y la ampliación que se quiera obtener, se mueve, por medio de una cremallera y de un piñón, el objetivo respecto del objeto, lo cual cambia la posición de *AP* (fig. 596) con respecto al plano focal.

Colócase el objeto transparente en un bastidor *GH* (fig. 599), y se le dispone al revés, para que la imagen, invertida con relación al objeto, parezca derecha.

Soporte de reflexión total. — En algunos casos, el objeto cuya proyección se desea no puede colocarse sino horizontalmente. Entonces, empléase un *soporte de reflexión total* MEM' (fig. 600). Este aparato consta de un primer espejo M, inclinado a 45° que recibe los rayos procedentes del condensador, los cuales se refractan en el objetivo propiamente dicho E, de donde inciden en un segundo espejo M', inclinado también 45°, que los envía horizontalmente y proyecta la imagen en la pantalla vertical.

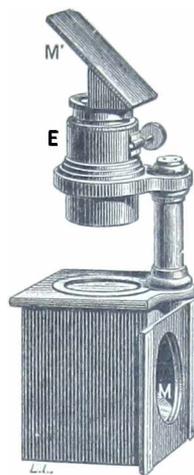


Fig. 600.

Proyección de objetos muy pequeños. — *Empleo del microscopio.* — Para proyectar objetos muy pequeños, especialmente *preparaciones microscópicas*, y obtener imágenes de ellos muy ampliadas, se usa un microscopio compuesto (578), en vez de un objetivo ordinario. Se concentra la luz de la linterna en el objeto, por medio de lentes adecuadas. Para evitar el excesivo aumento de temperatura que produciría el calor de la linterna, que se concentra también en el objeto, al mismo tiempo que la luz, interpónese entre los rayos que iluminan, un cubo terminado por láminas de caras paralelas y que contiene una solución de alumbre que absorbe el calor sin debilitar la luz.

Proyección de objetos opacos. — *Megascopios.* — Las linternas destinadas a proyectar los objetos opacos se denominan megascopios. El objeto debe estar muy bien alumbrado, porque, para la proyección, conviene utilizar la luz relativamente débil que él difunde hacia el objetivo. La figura 602 representa un modelo reducido de megascopio (I, 1); se le arma sobre el condensador de la linterna, el objeto se coloca en A y el objetivo en O.

La figura 601 representa un modelo se megascopio destinado especial-

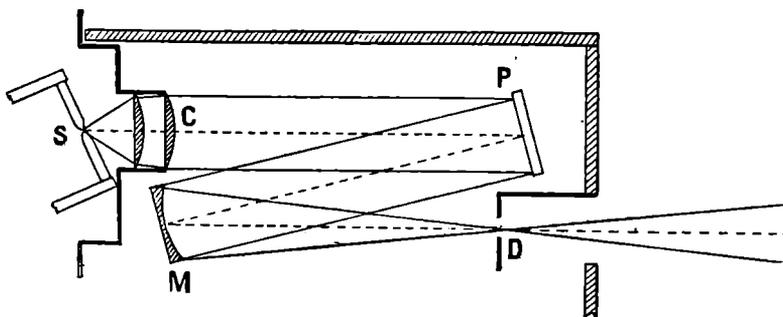


Fig. 601.

mente para proyectar las fotografías de los colores por el método interferencial (660), inventado por Watteville. La luz de un arco eléctrico S que el condensador C hace paralela, incide en la fotografía P, y se refleja en un espejo cóncavo M que da una imagen ampliada en la pantalla de proyección. En D hay un diafragma que se cierra cuando se cambian las vistas proyectadas.

Luz fría de M. Dussaud. — Las linternas de proyección ordinarias tienen el inconveniente de necesitar luz que despidе mucho calor, a veces peligroso y siempre nocivo; y á más de esto no utilizan la parte central del foco de luz.

M. Dussaud ha realizado una *luz fría* construyendo una lámpara eléctrica de filamento de tungsteno enrollado en espirales de unos 2 milímetros de diámetro y a 1 milímetro de distancia. Un condensador de foco corto utiliza enteramente esta luz. El rendimiento debido a su volumen reducido, permite emplear cuatro veces menos de energía eléctrica que con el arco. La posibilidad de colocar la luz dos veces más cerca del condensador, sin que haga explosión, reduce aún a un cuarto el gasto de energía. Por fin M. Dussaud aumenta el voltaje de la lámpara de 25 a 100 por 100, lo que también produce una economía de 2 a 6 veces. Es verdad que reduce la vida de la lámpara de 100 horas a 1 hora, pero la economía de la corriente compensa con mucho el gasto de bombillas.

La economía total de energía es pues de unas 100 veces (producto de las economías parciales): luego, para el mismo alumbrado se desprende 100 veces menos calor sobre el objeto, resultando así una luz prácticamente fría. Y aun en ciertos casos, para que no

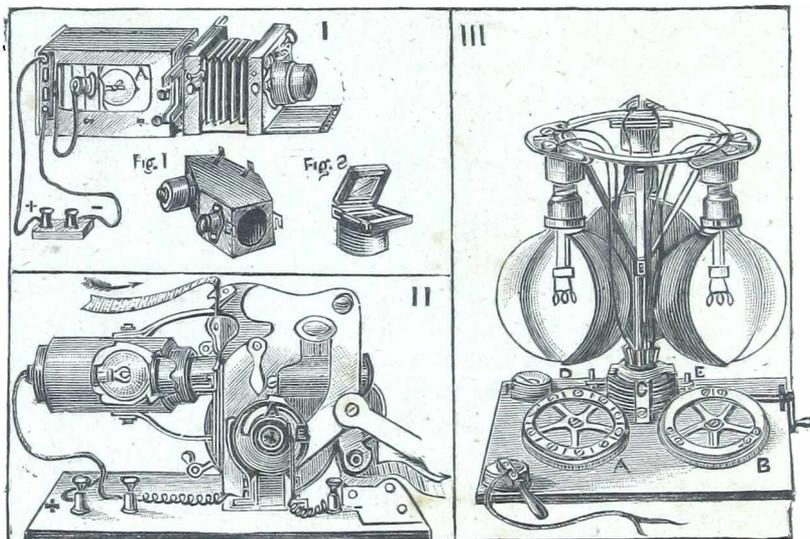


Fig. 602.

pueda acumularse el calor, se envía la corriente por intermitencia, como si se hubiese suprimido la acción calorífica de la corriente, sin perder su acción luminosa.

Los aparatos (fig. 602) realizan este resultado.

Proyección. — La bombilla A está colocada en el lado del aparato, estando el filamento a 3 centímetros del condensador, con el eje de la hélice perpendicular al eje óptico. Un pequeño reóstato permite variar la intensidad luminosa.

Si se quiere aplicar el principio de la interrupción de la corriente, u obtener vistas degradadas, se emplean dos aparatos superpuestos. Entonces se envía alternativamente la misma corriente a las dos bombillas, maniobrando los reóstatos en sentido contrario.

Para proyectar los cuerpos opacos se emplea el pequeño megascopio (fig. 602, I); para proyectar los objetos en un plano horizontal, se pone la linterna verticalmente y se coloca en el objetivo un espejo de 45 grados.

Hay otros accesorios que permiten proyectar preparaciones microscópicas sin que el calor las deteriore:

Cinematógrafo. — Un conmutador A (fig. 602, II) calzado en el árbol del manubrio envía, por los peines B, la corriente a la bombilla sólo durante el tiempo que la película está inmóvil delante del objetivo.

Faros. — *Telegrafía óptica.* — *Investigaciones científicas.* — Empleáanse tres lámparas que giran al rededor de un eje vertical (fig. 602, III) con clavijas que se ponen en comunicación con conmutadores giratorios A, B, por medio de una corona C y de peines DE. Los conmutadores dan la corriente a las lámparas durante el tiempo fijado y en el orden

que se quiera. También se obtienen destellos intermitentes correspondientes a las combinaciones usadas en los telégrafos ópticos y los faros de resplandores.

Para la fotografía instantánea se pueden emplear también los relámpagos luminosos de las lámparas intensas en vez del magnesio.

La luz fría intensa puede atravesar los tejidos del cuerpo; poniendo la mano delante de una fuente luminosa, se distinguen los vasos sanguíneos con sus colores naturales; luego la luz fría se presta para estudios fisiológicos interesantes. Debemos añadir por fin que las corrientes muy débiles que requieren estos procedimientos, se pueden obtener, a falta de electricidad urbana, con una pequeña batería de pilas o de acumuladores, o con una dinamo minúscula movida a mano.

575. — **Lente o microscopio simple.** — La lente o microscopio simple es un aparato destinado a ver, con mayor diámetro aparente, objetos pequeños cuyos detalles escaparían a la simple vista.

Es una simple lente convergente de corto foco que se coloca ante el ojo. El objeto que se examina AP se pone delante del plano focal de la lente (fig. 603); la lente da su imagen virtual y recta A'P'.

Enfocamiento. — Para ver claramente la imagen A'P'; es preciso que esté a una distancia OP' del ojo, comprendida entre la distancia mínima y la distancia máxima de visión distinta. Si el centro óptico del ojo está en el foco-imagen F', el diámetro aparente de la imagen no depende

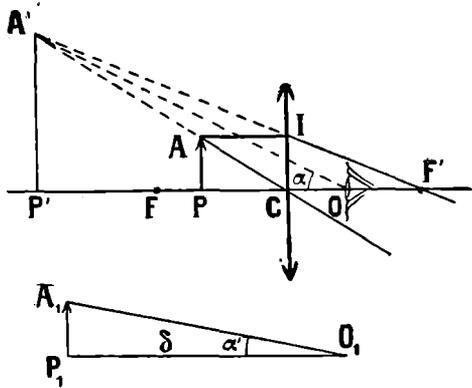


Fig. 603.

de su distancia; es igual al ángulo IF'C; entonces conviene *enfocar* modificando la distancia del objeto a la lente, o inversamente, de tal manera que A'P' esté en el *punctum remotum* del ojo (al infinito para el ojo normal, estando entonces el objeto en el foco-objeto F), para evitar la fatiga de acomodación. La construcción hace ver, además, que si el centro óptico del ojo está entre C y F', el diámetro aparente de la imagen es tanto más grande cuanto más cerca está ésta. En ese caso se podría enfocar de tal manera que la imagen se produzca en el *punctum proximum*; pero siendo débil el aumento del diámetro aparente, es preferible, sobre todo en las observaciones prolongadas, enfocar aún para el *remotum*, para evitar la fatiga. Cuando el centro óptico del ojo está más allá de F', el diámetro aparente es tanto más grande cuanto más lejos esté la imagen, y entonces el enfocamiento para el cual la imagen está en el *remotum*, es el más conveniente y el menos fatigoso.

Si es pequeña la distancia focal, también serán pequeños los movimientos que se deben dar al objeto o a la lente para el enfocamiento; porque cuando se mueve el objeto cerca del foco, el movimiento correspondiente de la imagen es mucho mayor.

Sin la lente se obtendría el máximo de diámetro aparente poniendo el objeto a la distancia mínima de visión distinta; entonces estaría en el

ángulo $A_1O_1P_1$ mientras que el aparato le hace ver en ángulo más grande $A'OP'$.

Potencia. — Dicese que una lente es más potente que otra, cuando hace ver el mismo objeto en mayor diámetro aparente, permitiendo entonces distinguir mejor los pequeños detalles. La *potencia* de una lente es la *relación entre el diámetro aparente con que se ve un objeto lineal y su longitud*.

Si el ojo está en el foco F o si la imagen $A'P'$ se forma al infinito, la potencia es igual a la convergencia de la lente; en todos los casos defiere muy poco. La potencia se expresa en *dioptrías*.

Aumento. — Llámase aumento la *relación entre el diámetro aparente bajo el cual se ve un objeto a través de la lente y el diámetro aparente máximo bajo el cual se ve el mismo a la simple vista*.

El aumento es tanto más grande, cuanto mayor es la distancia mínima de visión distinta.

Microscopio simple. — Este nombre se reserva en particular al cristal de aumento, cuando está provisto de una armadura destinada a hacer más fácil su empleo. En un montante horizontal E (fig. 604), que puede subirse o bajarse por medio de una barra dentada y de un piñón de botón D , está dispuesto un *ojete negro* m , que mantiene una lente de mayor o menor aumento. Debajo se halla el *porta-objeto*, donde se coloca el objeto entre

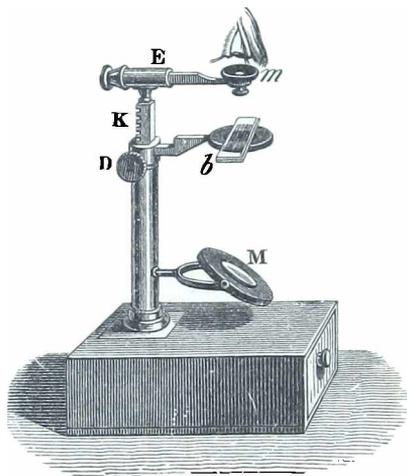


Fig. 604.

dos láminas de vidrio b ; la luz difusa de la atmósfera se recibe en un espejo cóncavo M , inclinado de manera conveniente para lanzar sobre el objeto un haz de rayos convergentes. Se coloca la vista muy cerca de la lente, y se sube o se baja por medio del botón D hasta enfocar.

576. *Cálculo de la potencia y del aumento de una lente.* — Supongamos el ojo en O (fig. 603) a una distancia a del centro óptico C de la lente. El diámetro aparente de la imagen es el ángulo $A'OP'$. La potencia ω es igual a la relación $\frac{A'OP'}{AP}$. El ángulo $A'OP'$ por ser muy pequeño, puede confundirse con su tangente $\frac{P'A'}{d}$ (siendo d la distancia mínima de la visión distinta).

Luego :

$$\omega = \frac{A'P'}{a} : AP \quad \text{o} \quad \omega = \frac{A'P'}{AP} \times \frac{1}{d}.$$

Pero

$$\frac{A'P'}{AP} = \frac{CP'}{CP} \quad \text{y} \quad \frac{1}{CP} - \frac{1}{CP'} = \frac{1}{f}.$$

De donde

$$\frac{CP'}{CP} = 1 + \frac{CP'}{f} = 1 + \frac{d-a}{f}.$$

Por consiguiente

$$\omega = \frac{1}{d} \left(1 + \frac{d-a}{f} \right) \quad \text{o} \quad \omega = \frac{1}{f} \left(1 + \frac{f-a}{d} \right).$$

La potencia m , calculada de este modo, se acerca todavía a $\frac{1}{f}$, porque d continúa siendo grande con relación a $f - a$, m es exactamente igual a $\frac{1}{f}$, sea cual fuere la vista cuando el ojo está en el foco F, porque, en este caso, $a = f$.

Aumento. — Para ver a simple vista, supuesto el ojo en O, el objeto con el diámetro aparente máximo, sería preciso colocarlo en A_1P_1 , a la distancia mínima de visión distinta δ . Su diámetro aparente sería $A_1O_1P_1$. Por lo tanto, el aumento es :

$$G = \frac{A'O_1P'}{A_1O_1P_1} \quad \text{o} \quad G = m \times AP : \frac{A_1P_1}{\delta}$$

O bien : $G = m \times \delta$.

Se ve, pues, que el aumento es igual al producto de la potencia por la distancia mínima de visión distinta del ojo del observador. Según esto se tiene,

$$G = \frac{\delta}{f} \left(1 + \frac{f - a}{d} \right), \quad \text{o} \quad \text{sensiblemente} \quad G = \frac{\delta}{f}$$

Se tiene exactamente $G = \frac{\delta}{f}$ cuando el centro óptico del ojo está en F, o cuando d es infinito. En todos los casos G aumenta con δ .

577. **Corrección de las aberraciones.** — **Dobletes.** — Las aberraciones de refrangibilidad y de esfericidad son tanto mayores en el microscopio simple cuanto más aumenta este el tamaño aparente de los objetos. La aberración de refrangibilidad se corrige por medio de lentes acromáticas, y la de esfericidad con diafragmas que sólo dejan pasar los rayos cercanos al eje (o rayos centrales).

También se corrige ésta usando dos pequeñas lentes plano-convexas superpuestas, cuyas caras planas miran el objeto. Este sistema de lentes recibe el nombre de *doblete de Wollaston*.

578. **Microscopio compuesto.** — El *microscopio compuesto* es un instrumento de óptica que sirve, como el sencillo, para facilitar la visión de objetos muy pequeños, reemplazándolos por una imagen virtual, invertida y muy aumentada.

Reduciéndolo a su mayor grado de sencillez, el aparato está formado por dos lentes convergentes, una de corto foco, llamada *objetivo*, porque

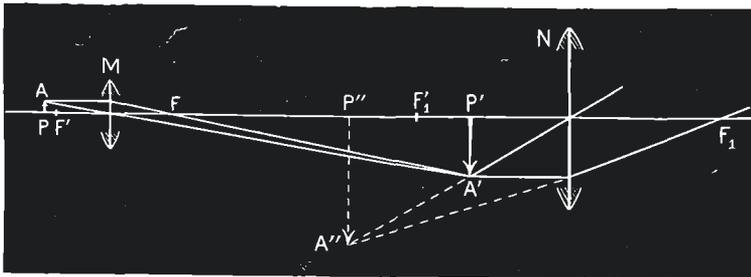


Fig. 605.

está hacia el lado del objeto: y otra menos convergente, que se denomina *ocular*, porque está junto a la vista del observador. Estas dos lentes se colocan en un mismo tubo, de tal manera que sus ejes coincidan.

Marcha de los rayos. — Si un objeto AP se encuentra muy cerca y algo más allá del foco principal F del objetivo M, entonces va a formarse al otro lado del objetivo, mucho más lejos que el foco-imagen F' (fig. 605), una imagen aérea A'P', real, invertida y aumentada. Pero se procura que la distancia del vidrio M al objeto sea tal que la imagen A'P'

caiga entre el ocular N y su foco F_1 . De ahí resulta que este último vidrio produce el efecto de una lente, y sustituye la imagen $A'P'$ por otra $A''P''$, virtual, más aumentada todavía, recta relativamente a la primera y, en consecuencia, invertida respecto del objeto.

El ojo, colocado detrás del ocular, ve esta imagen con un gran diámetro aparente. La figura 606 representa la marcha del haz de rayos que, saliendo del punto A del objeto, incide en el objetivo y atraviesa sucesivamente los dos cristales.

579. **Enfocamiento. — Visión en profundidad.** — Para enfocar el microscopio se le dispone de manera que la imagen $A''P''$ aparezca a la distancia mínima de la visión distinta del observador. Este resultado se obtiene moviendo el ocular como una lente delante de la imagen real $A'P'$; pero generalmente se mueve todo el instrumento, cuidando de que sea constante la distancia del objetivo y el ocular, de modo que se pueda acercár más o menos el objetivo al objeto. En estas

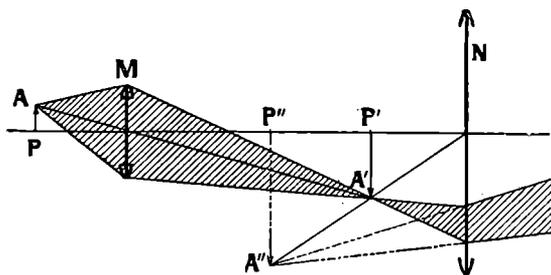


Fig. 606.

condiciones, siendo la distancia PF' (fig. 605) muy débil para pequeños cambios de sitio del objeto, la distancia de la imagen $A'P'$ varía mucho; luego el microscopio sólo puede estar bien enfocado para puntos contenidos entre dos planos perpendiculares a su eje o muy próximos, sobre todo si el aparato es potente. Se dice que en un microscopio la *visión en profundidad* es poco extensa. Por esta razón se cortan en láminas muy delgadas los objetos que se observan.

580. **Descripción de un microscopio.** — Como tipo de microscopio de precisión, vamos a describir un modelo reciente de la casa Nacet.

1º *Cuerpo del instrumento.* — Compónese de un sistema de dos tubos de cobre T y T' (fig. 607), de los cuales el primero tiene en su parte inferior una espiga en espiral que facilita la aplicación en O' de diferentes objetivos. El ocular O va en el segundo tubo T' que puede correr suavemente en el tubo T: esto permite variar la distancia del objetivo al ocular y por lo tanto el aumento. Una cremallera C que puede moverse fácilmente mediante dos anchas cabezas de tornillo, permite acercar o alejar, como se quiera, el sistema óptico del objeto que se ha de observar: esta operación constituye lo que se llama *enfocamiento rápido*.

Para el *enfocamiento* lento y más justo que necesita el empleo de los aumentos fuertes hay en la columna M un segundo movimiendo. Este movimiento es micrométrico y se verifica mediante un tornillo micrométrico de pequeña espira que se maneja por medio del botón V, el cual hace subir o bajar lentamente la parte inferior del microscopio y por consiguiente el objetivo.

2^o *Platina*. — El objeto que se trata de observar por transparencia se

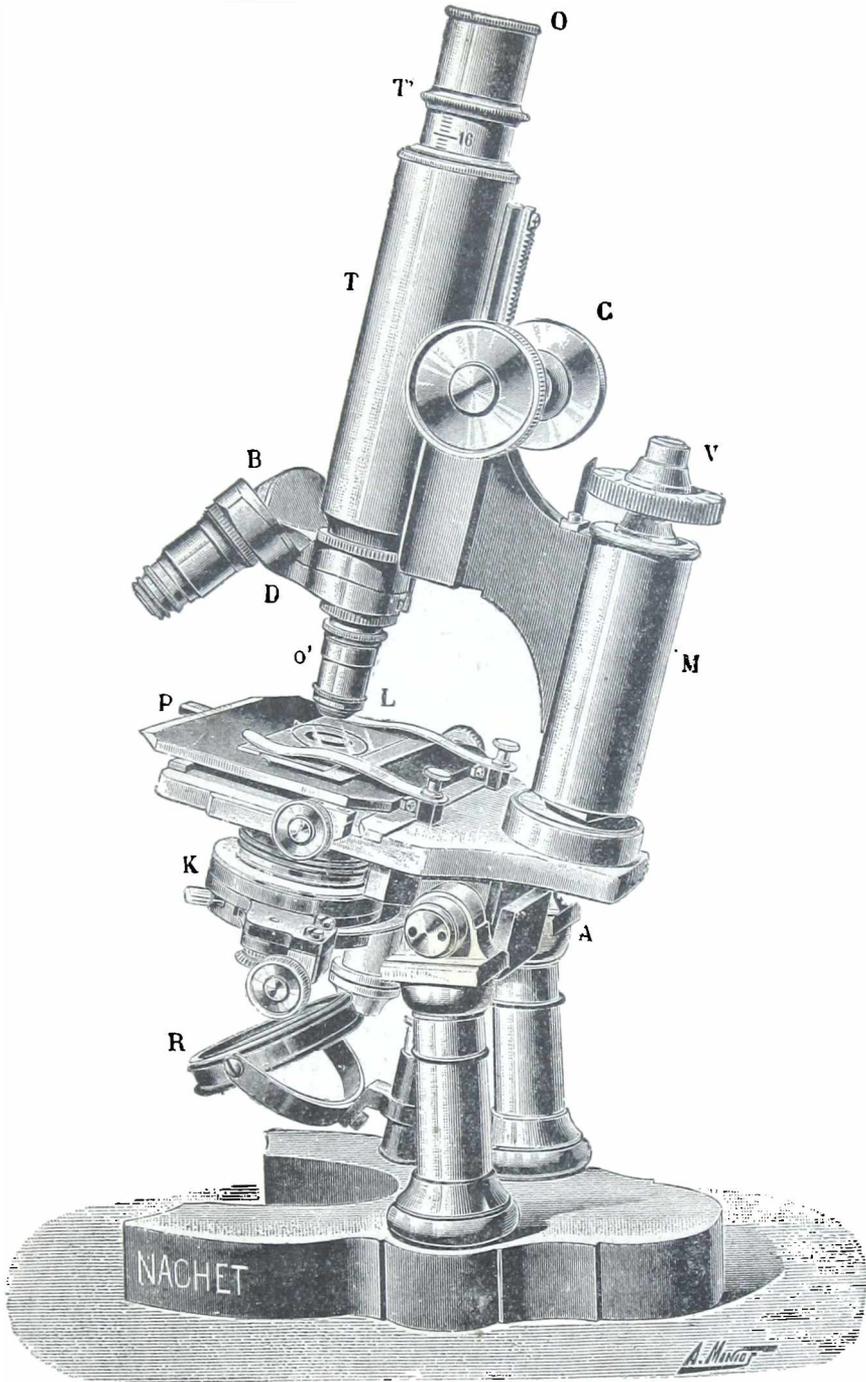


Fig. 607.

coloca sobre una lámina de vidrio llamada *porta-objeto* y se le cubre con otra más delgada llamada *ubre-objeto*. Esta preparación L se coloca

entonces sobre la platina o plataforma P, que tiene en el centro un agujero por donde pasa la luz que envía un reflector. La platina P puede moverse horizontalmente por medio de dos botones colocados en los costados. Con esta disposición se pueden pasar regularmente delante del objetivo los diversos puntos de la preparación. También se da el caso de tener la platina un movimiento de « rotación sobre sí misma » en torno del eje óptico.

OBSERVACIÓN. — Toda esta parte superior del instrumento está armada con *frotamiento duro* sobre un eje horizontal A sostenido por dos columnas. Mediante esta disposición se la puede inclinar o tener fija, como se quiera, en todas las inclinaciones desde la vertical hasta la horizontal.

3º y 4º. *Reflector y Alumbrado condensador*. — Este reflector es un espejo cóncavo de vidrio R montado sobre vástagos articulados para que sea posible darle todas las posiciones e inclinaciones, concentrando así sobre el objeto la luz difusa de la atmósfera o de cualquier foco luminoso. Entre el reflector y la platina P hay un soporte movable K que puede recibir rodajas con agujeros de diversos tamaños, con las cuales se puede arreglar la cantidad de luz que llega al objeto. Pero se obtiene aun mejor resultado empleando un diafragma con diferentes agujeros (de 1 mm. a 25 mm.) tal como el llamado *diafragma-iris*.

Además, el soporte puede recibir (para hacer ciertas observaciones) un sistema óptico convergente que concentra la luz sobre el objeto; esto se llama *alumbrado condensador*.

OBSERVACIÓN. — Los objetos observados son en general bastante transparentes para que sea posible iluminarlos por debajo; en el caso de que no lo permita su opacidad, se les alumbra por encima, valiéndose de una lente convergente, montada en un pie de articulaciones; colócala de manera que la luz difusa de la atmósfera se concentre sobre el objeto.

581. **Aumento y potencia.** — *Cámara lúcida de Nacet*. — Para medir el aumento se utilizan un *micrómetro* y una *cámara lúcida*.

La *cámara lúcida* consiste en un prisma de vidrio de *reflexión total*. La de Nacet (fig. 608, I y II) es un prisma doble de crown *abc*, truncado en *c* (fig. 608, II), que está colocado en una armadura de cobre (fig. 608, I) cuyas caras superior e inferior se taladran. De esta manera se puede colocar el prisma encima del ocular del microscopio. Si se dispone cerca del instrumento una hoja de papel P, cualquier objeto que descansa en ella, por ejemplo la punta de un lápiz A, envía al prisma un haz de luz que penetra en él normalmente a la cara *c*, sufre una primera reflexión total en *bc*, una segunda en la cara *a*, y desde allí llega a la vista como si saliera del microscopio. En *a* se encuentra un pequeño prisma rectángulo que se adapta al primer prisma pegándolo con bálsamo del Canadá, líquido transparente y cuyo índice refracción supera apenas al del crown; gracias a este prisma adicional, los rayos que emergen del ocular o atraviesan de esta manera una lámina delgada de caras paralelas, y llegan a la vista sin desviación. Así pues, el obser-

vador ve simultáneamente en el campo del microscopio el lápiz y la imagen de los objetos que se trata de observar. Si es preciso, puede seguir con el lápiz los contornos de aquélla.

Para medir el aumento colócase en el porta-objeto un micrómetro, dividido en *centésimos de milímetro* por ejemplo; después y por medio de la cámara lúcida se proyecta sobre la imagen de las divisiones del

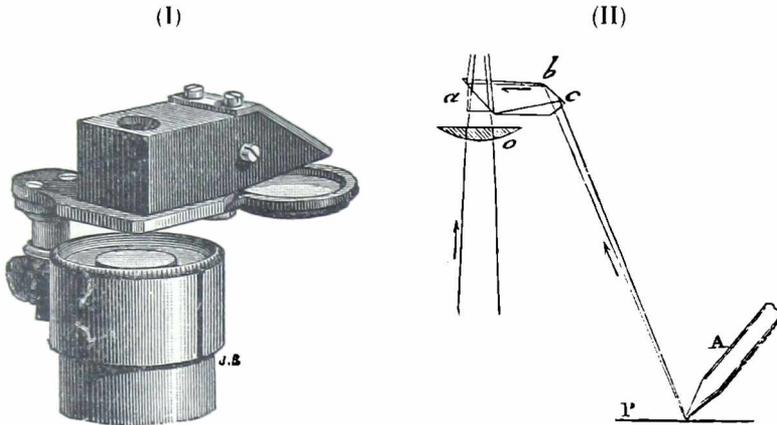


Fig. 608.

micrómetro la de una escala en milímetros hecha en papel blanco. Supongamos que 12 divisiones del micrómetro cubran 120 milímetros de la escala, de ahí se deduce que el aumento es igual a 1 200.

Recíprocamente, una vez conocido el aumento, se deduce de él la magnitud real de los objetos dividiendo la magnitud de la imagen, obtenida con la cámara lúcida, por el aumento.

La potencia se obtiene dividiendo el aumento hallado por la distancia mínima de la visión distinta, que es la distancia del ojo a la escala. Si esta distancia se expresa en metros, la potencia estará expresada en dioptrías.

Cálculo de la potencia. — Sea l la longitud AP (fig. 605, del objeto; α , el ángulo con que aparece en el microscopio; la potencia de éste es $\Pi = \frac{\alpha}{\gamma}$. Sea γ el aumento lineal del objetivo; la imagen A'P' tiene una magnitud γl ; como el ocular permite verla bajo el ángulo α , su potencia será :

$$m = \frac{\alpha'}{\gamma l} \quad \text{y, por consiguiente} \quad \Pi = m\gamma;$$

la potencia del microscopio es, pues, el producto de la potencia de su ocular por el aumento lineal que da su objetivo.

Esta relación permanece exacta cuando el ocular y el objetivo sean compuestos (582) en vez de ser simples.

Por otra parte, llamemos f a la distancia focal del objetivo y f' a la del ocular, y tendremos, empleando la notación común de las fórmulas de las lentes :

$$\gamma = \frac{A'P'}{AP} = \frac{p'}{p}.$$

Pero

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = \frac{1}{f}$$

De donde

$$\frac{p'}{p} = \frac{p'}{f} - 1.$$

Designemos p' por L , que es poco más o menos la distancia de los dos cristales, porque $A'P'$ está muy cerca del ocular; y tendremos :

$$\gamma = \frac{L}{f} - 1.$$

Pero, como $\omega = \frac{1}{f}$, resultará

$$\Pi = \frac{1}{f'} \left(\frac{L}{f} - 1 \right).$$

Fórmula que puede simplificarse de este modo :

$$\Pi = \frac{L}{ff'};$$

porque como L es grande respecto de f , $\frac{L}{f}$ es mucho mayor que 1, y el 1, delante de este término, puede despreciarse.

Aumento. — El aumento está ligado a la potencia por la misma relación que en la lente (576). Es decir, que

$$G = \Pi \delta,$$

representando por δ la distancia mínima de la visión distinta al ojo del observador.

582. **Objetivos y oculares empleados en los microscopios binoculares.** — 1º *Objetivos.* — El objetivo se compone de tres o cuatro pequeñas lentes acromáticas convergentes (fig. 609).



Fig. 609.

2º *Ocular negativo de Huyghens.* — El ocular es, generalmente, un ocular negativo de Huyghens, que, en igualdad de potencia, da mayor campo (583).

Se compone (fig. 610) de dos lentes planoconvexas, de las cuales una, vuelta hacia el objetivo, tiene una distancia focal φ triple de la otra.

Dichas lentes están separadas por una distancia igual a $\frac{2}{3}\varphi$. Sus caras convexas están vueltas hacia el objetivo. La posición de la imagen dada por éste cae entre los dos cristales del ocular y de tal manera que el primero produce una imagen real de él, más pequeña que $A'P'$. El segundo cristal funciona como lente.



Fig. 610.



Fig. 611.

3º *Ocular positivo de Ramsden.* — Este ocular se emplea en los anteojos de ocular micrométrico (19). Compónese de dos lentes planoconvexas (fig. 611) cuyas caras convexas están vueltas una hacia otra. Tienen la misma distancia focal y están separadas por una distancia igual al tercio de la distancia focal común.

Este ocular funciona como una lente compuesta.

La imagen $A'P'$ dada por el objetivo debe caer más acá del primer cristal, y en este punto es donde ha de colocarse el micrómetro.

Microscopios binoculares. — También se construyen microscopios binoculares, que tienen la ventaja de producir la impresión del relieve de los objetos que se miran. Algunos tienen dos objetivos y dos oculares, armados en dos tubos separados. El microscopio binocular Quidor y Nachet sólo tiene un objetivo. Un doble prisma de reflexión total separa los rayos luminosos procedentes del objetivo, en dos haces y los dirige hacia dos oculares. El aumento de este instrumento llega a 400 mientras que los microscopios de dos objetivos no pueden pasar de 80.

583. **Campo.** — **Diafragma.** — **Punto ocular.** — Llámase *campo* el espacio en que están comprendidos todos los puntos visibles a través del microscopio. Para limitar el campo a puntos de los cuales el instrumento dé una imagen neta y alumbrada uniformemente, se coloca, en el plano donde se forma la imagen real dada por el objetivo, un disco de latón con una abertura conveniente, que se denomina el *diafragma*.

En el caso de un objetivo y de un ocular simples, el campo está limitado por una superficie cónica que tenga por vértice el centro óptico del objetivo y por base el diafragma. La segunda sección de este cono determina sobre el objeto un círculo que con-

tiene los puntos que se ven en el instrumento. Cuando un objeto pasa de los límites del campo, solo una parte es visible. Pero si se añade al ocular un cristal n (fig. 612) para formar un ocular de Huygens, se ve que los rayos luminosos se han acercado al eje. De este modo el punto considerado puede entrar en el campo del instrumento. Por esta razón el cristal n se denomina *cristal de campo*. Demuéstrase que, a igualdad de potencia,

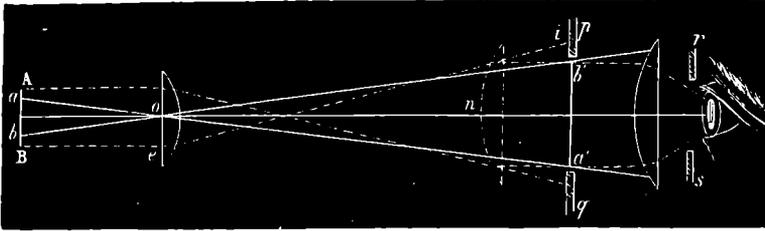


Fig. 612.

el ocular de Huygens da mayor campo que cualquiera otro. Tiene además la ventaja de corregir las aberraciones cromáticas del objetivo.

Punto ocular. — Los rayos que entran en el microscopio, atraviesan todos el objetivo. Luego, después de la refracción en el ocular, deben atravesar una imagen del objetivo dada por el ocular. A esta imagen muy pequeña se le da el nombre de *punto ocular*. Formase muy cerca y del otro lado del ocular, porque la distancia del objetivo al ocular es grande respecto de la distancia focal del mismo ocular.

584. *Aplicaciones del microscopio.* — Las aplicaciones del microscopio son sumamente variadas. No sólo se emplea en Física, Química y en las Ciencias biológicas (histología, bacteriología); sino también en numerosas industrias: fabricación de cervezas, alcoholes, vinos, examen de pastas papel, de sericultura, etc.

Examen microscópico de los metales. — *Metalografía.* — El estudio microscópico de la constitución de los metales y de las aleaciones industriales ha adquirido gran importancia en pocos años. Consiste en pulir la superficie de un metal; luego, tratarlo superficialmente por medio de reactivos a propósito que atacan a ciertos elementos más que a otros, para hacer visible la constitución del metal. Este método, descubierto por Sorby, y desarrollado por Martens, Wedding y Osmond, se ha vuelto industrial después



Fig. 613.



Fig. 614.

de los trabajos de Le Chatelier. Para estudiar un metal opaco, hay que iluminar intensamente su superficie. Para esto se emplea una fuente luminosa cuya luz penetra en el microscopio por una abertura lateral; esta luz es enviada al cuerpo estudiado, por un espejo o un pequeño prisma de reflexión total instalado en el microscopio.

Tales microscopios son de diversos tipos, de entre los cuales merecen citarse los de Cornu y Charpy, de Nachet y, finalmente, el de Le Chatelier, que es el más usado en Francia.

También puede emplearse el microscopio para fotografiar la superficie metálica (656), después de atacarla. Este procedimiento se denomina *metalografía microscópica*. Las figuras 613 y 614 son reproducciones de dos fotografías obtenidas de ese modo. La pri-

mera es la de la superficie de un acero recocido (atacado por una solución de ácido pícrico). En ella se ven los dos componentes de este acero : la *ferrita** (en blanco) y la *perlita*** (en negro). La segunda figura es la de un acero templado. Representa únicamente el constituyente más general de los aceros templados, la *martensita*.

Gracias a los estudios efectuados durante estos últimos años, de entre los cuales citaremos las notables investigaciones de Guillet, la metalografía presta importantes servicios industriales, porque permite, hasta cierto punto, deducir del simple examen microscópico las propiedades del metal estudiado (resistencia, elasticidad, etc.).

585. **Ultra-microscopios.** — Sean cuales fueren los perfeccionamientos introducidos en los microscopios, algunos objetos o detalles de objetos extremadamente pequeños escapan a las observaciones que con estos instrumentos se efectúan. Esto se debe a que no se puede aumentar infinitamente su *poder separador* (674). No obstante, se ha podido observar objetos *ultramicroscópicos*, fundándose en el principio siguiente.

Mediante rayos que no penetren directamente en el microscopio, ilumínase una sección sumamente delgada de la substancia transparente que se estudia. Todos los granos contenidos en el cuerpo, están, por pequeños que sean, vivamente iluminados y aparecen

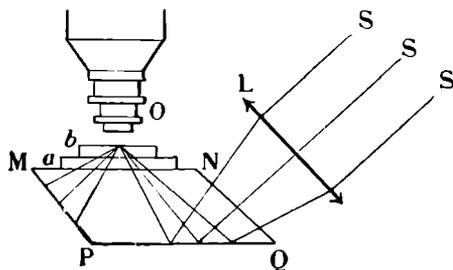


Fig. 615.

colocada en la dirección S, emite luz a la lente L que la concentra en el bloque de vidrio. Refléjase totalmente la luz en la cara PQ, y luego, en la última cara de la lámina b. La luz difractada (672) por las partículas ultramicroscópicas es la única que puede penetrar en el objetivo O del microscopio.

Para dar una idea de la pequeñez de los objetos que se pueden observar, diremos que Siedentopf y Szigmondy han llegado a ver, en un cristal coloreado con oro, partículas de $0,005\mu$, que son 25 veces más pequeñas que los objetos microscópicos más pequeños. El método puede prestar importantes servicios en el estudio de los microbios actualmente invisibles por medio de los microscopios ordinarios y en el de las partículas sumamente tenues de las soluciones coloidales. Empléase también el ultramicroscopio para descubrir microbios invisibles con el microscopio ordinario. El Dr Comandon ha unido el cinematógrafo ultramicroscopio para estudiar y anotar los movimientos de ciertos microbios (espirochetos, tripanosomos, etc.).

ANTEOJOS Y TELESCOPIOS

586. **Anteojo astronómico.** — El anteojo astronómico es un aparato que sirve para observar los cuerpos celestes. Compónese de un objetivo convergente O (fig. 616), de larga distancia focal, y de un ocular O', de corto foco.

1º *Marcha de los rayos****. — El objetivo O da una imagen A'P' real e

* La ferrita es hierro puro.

** La perlita es una mezcla eutéctica (331) de ferrita y de una combinación de hierro y carbono, la *cementita* (Fe₃C) que se encuentra en exceso yuxtapuesta a la perlita, en los aceros muy carburados.

*** En esta construcción no se representa sino el eje secundario extremo del objeto que se mira; porque, en realidad, este objeto está siempre muy distante del objetivo. La misma observación se aplica, luego, a todos los aparatos astronómicos.

invertida del astro que se observa, imagen que se produce en el foco principal F' del objetivo, a causa de la gran distancia del objeto. Se la mira con un ocular compuesto que sirve de lente. Suponiéndolo redu-

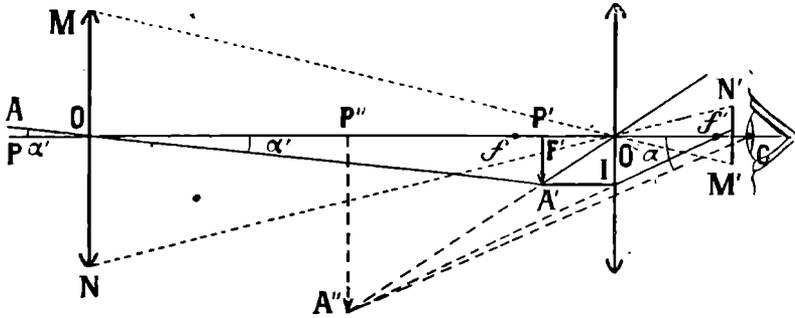


Fig. 616.

cido a la lente O' , obtendremos, por la construcción conocida, una imagen virtual $A''P''$ de la imagen real $A'P'$.

Se ve (fig. 617) la marcha del haz luminoso que de un punto del astro pasa a través del anteojo.

2º *Ocular compuesto.* — El ocular de un anteojo astronómico nunca es, como supone la figura anterior, una lente simple; sino que es siempre un *ocular compuesto*, formado, generalmente, por dos lentes.

Círculo ocular. — Todos los rayos que penetran en el aparato han atravesado el objetivo. Después de pasar por el ocular, encuentran todos una imagen $M'N'$ del objetivo, dada por el ocular, a la que se denomina *círculo*, *anillo* o *disco ocular*. Se encuentra fácilmente moviendo una pantallita de papel detrás del ocular de un anteojo cuyo objetivo se ilumina intensamente. Se verá que en el papel se dibuja una pequeña imagen circular: es la del objetivo, porque, si se aplica contra

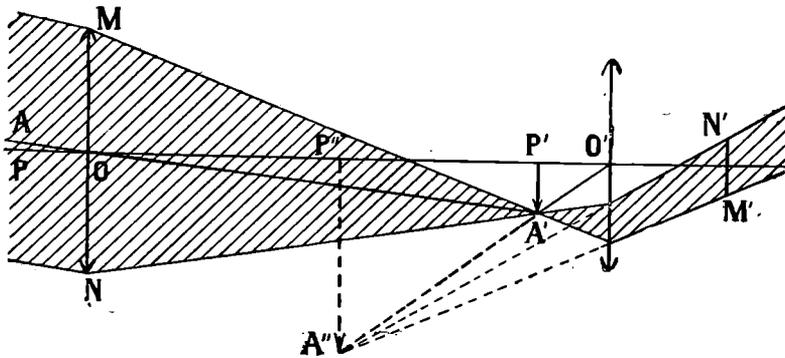


Fig. 617.

este último un objeto opaco, la imagen de este objeto aparece en el disco ocular. Como el ocular es muy convergente y el objetivo se halla a gran distancia de él, el disco ocular tiene diámetro muy pequeño y se forma muy cerca del plano focal del ocular. Para que el ojo reciba

todos los rayos penetrados en el aparato, — lo cual da el máximum de iluminación a las imágenes y produce el mayor campo posible, — se dispone un *ojete* detrás del ocular, de tal manera que el ojo no se ponga en contacto con el ocular y que la pupila coincida con el disco ocular. El centro óptico C del ojo está, pues, cerca del foco-ímagen f' del ocular.

587. Enfocamiento. — Cuando una persona dotada de vista normal mira por un anteojo astronómico, puede, para evitar el cansancio de acomodación, arreglarse de modo que la imagen definitiva $A''P''$ se produzca en el infinito. Para esto, es preciso que el foco f del ocular coincida con el punto P' , es decir, con el foco del objetivo. Si al primer observador sucede un miope, como éste no puede ver claramente una imagen situada en el infinito, tendrá que *acercar el ocular al objetivo*. De este modo, la imagen $A'P'$ se producirá entre el centro óptico O' y el foco f' del ocular y la imagen $A''P''$ será trasladada a una distancia tal que pueda verla el ojo miope. Es de notar que si el centro óptico del ojo está en f' sea cual fuere la distancia de la imagen $A''P''$, ésta se verá con el mismo diámetro aparente, porque la recta $A''f'O'$ conserva inclinación constante sobre el eje. Por lo tanto un ojo miope ve un objeto, en un anteojo astronómico, con el mismo diámetro aparente que lo vería una persona de vista normal.

A fin de conseguir el enfocamiento, el objetivo se halla colocado en el extremo de un tubo grueso de latón por el cual puede resbalar otro tubo que contiene el ocular.

588. Aumento. — Si se mira al astro a simple vista, se ve bajo un diámetro aparente $AOP = \alpha'$ (fig. 616). En efecto, sea cual fuere el punto, ya en O, ya en C, por donde se mire, como el objeto está muy lejano, se ve siempre bajo el mismo ángulo. Pero si se aplica el ojo en C y se mira a través del anteojo, se ve la imagen que da el aparato bajo un ángulo mayor $A''CP'' = \alpha$. De ahí resulta que el objeto parece mayor y, por consiguiente, más próximo.

Lámase *aumento* del aparato la relación $G = \frac{\alpha}{\alpha'}$ del diámetro aparente de la imagen, vista a través del aparato, al diámetro aparente del objeto, visto a simple vista.

Cálculo del aumento. — El ángulo α es el ángulo bajo el cual se ve la imagen $A'P'$, con el ocular. Si llamamos ω a la potencia del ocular, tendremos:

$$\alpha = \omega \times A'P'.$$

En cuanto a α' , este ángulo es igual a $A'OP'$. Podemos substituir este ángulo por su tangente $\frac{A'P'}{OI'}$, o $\frac{A'P'}{F}$ (llamando F a la distancia focal del objetivo), y resultará:

$$G = \omega \times A'P' : \frac{A'P'}{F} = \omega F.$$

El aumento de un anteojo es, pues, igual al producto de la potencia de su ocular por la distancia focal de su objetivo.

Esta fórmula se aplica ovidentemente al caso en que el ocular simple se reemplace por un sistema de varias lentes u ocular compuesto, que es el caso más frecuente en la práctica.

Si el ocular es simple, de distancia focal f , y si el ojo se halla en su foco, o si la distancia de visión es infinita, ω es igual a $\frac{1}{f}$, y $G = \frac{F}{f}$.

Longitud del antejo. — Es, poco más o menos, igual a la suma de las distancias focales del objetivo y del ocular. Como los anteojos de mayor aumento son aquellos cuyo objetivo tiene gran distancia focal, la longitud del aparato crece con su aumento. Para un aumento 1 000, la longitud llega a 8 metros. El aumento máximo, obtenido es de unos 6 000.

589. Medida del aumento — 1º *Empleo de la cámara lúcida.* — La medida del aumento de un antejo se puede hacer por medio de la cámara lúcida, como para el microscopio. Con la cámara lúcida se puede mirar al mismo tiempo, con el instrumento o a la simple vista, una mira lejana en la que se hayan hecho trazos equidistantes. Así se observa cuántas divisiones vistas a la simple vista cubre una división aumentada por el antejo, sea n ese número. Esto significa evidentemente que el diámetro aparente de una división vista en el antejo es n veces mayor que el diámetro aparente de la misma división vista a la simple vista. Luego el aumento es n . En rigor no hay necesidad de cámara lúcida, mirando con un ojo en el antejo y con el otro fuera del instrumento.

2º *Método del círculo ocular o del dinámetro de Ramsden.* — El objetivo desempeña respecto del ocular el papel de un objeto luminoso. Está situado a una distancia p del ocular que puede confundirse con $F + f$. Si llamamos y al diámetro del objetivo e y' al del círculo ocular, que es la imagen del objetivo dada por el ocular, tendremos, según una fórmula conocida :

$$\frac{y}{y'} = \frac{f}{p - f} = \frac{f}{F}.$$

De donde

$$\frac{F}{f} = G = \frac{y}{y'}.$$

La medida del diámetro del anillo ocular puede servir para la del aumento, principalmente para los anteojos potentes, a los que sería difícil aplicar el método de la cámara lúcida. Esta medida se efectúa por medio del dinámetro de Ramsden.

Consiste éste en una pequeña lente colocada en un sistema de tres tubos con dos alargaderas (fig. 618). 1 es el tubo que sostiene la lente; 2 es un tubo donde se halla un micrómetro M de cuerno translúcido, didividido en centésimas de milímetro; 3 es un tercer tubo, o mejor dicho, un anillo donde penetra el sistema de 1 y 2 y que se puede adaptar al ocular del antejo.

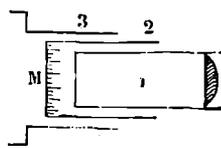


Fig. 618.

La armadura 3 se atornilla en el ocular del antejo.

Se introduce 1 en 2 hasta que se vea claramente la imagen del micrómetro, y luego todo en 3 hasta que la imagen del círculo ocular vaya a pintarse sobre la del micrómetro. Entonces se puede calcular la magnitud y' con toda la precisión de una medida efectuada por medio de la lente.

Para medir y se usa un compás cuyas puntas, colocadas sobre el objetivo, van a formar su imagen sobre la circunferencia del círculo ocular.

590. Reticulo. — *Eje óptico.* — El antejo astronómico sirve, generalmente, para determinar las direcciones en que se hallan los astros, en vista de las medidas astronómicas. Para esto, en el plano de mira del ocular se coloca un reticulo, formado por dos hilos de tela de araña cruzados (fig. 619). El reticulo se ve claramente, al mismo tiempo que las imágenes de los astros.

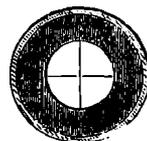


Fig. 619.

La recta que une el centro óptico del objetivo con el punto de intersección de los hilos del reticulo es el eje óptico del antejo. Por consiguiente, se pueden obtener tantos ejes ópticos como puntos se pueden elegir en el micrómetro. Moviendo el punto de cruce, varía la posición del eje óptico: pero en general se hace que éste coincida con el eje geométrico, es decir con el del tubo del antejo. Para determinar un punto, se dirige el antejo de manera que la imagen se forme exactamente en el cruce de los hilos. De día, los hilos del reticulo se des-

tacan claramente en el campo del anteojo; en la oscuridad hay que alumbrarlos por medio de un mechero de gas dispuesto lateralmente y cuyos rayos son dirigidos primero por medio de una lente al tope hueco que sirve de eje de rotación, y luego al retículo, gracias a un prisma pequeño de reflexión total.

591. **Campo.** — Explorador. — Campo de un anteojo es la región del espacio que puede verse a través del aparato. Lo mismo que en el microscopio, el campo del anteojo está limitado por un diafragma, colocado en el plano de la imagen real observada por el ocular (en el caso de un ocular simple y positivo), o por la segunda lente del ocular (en

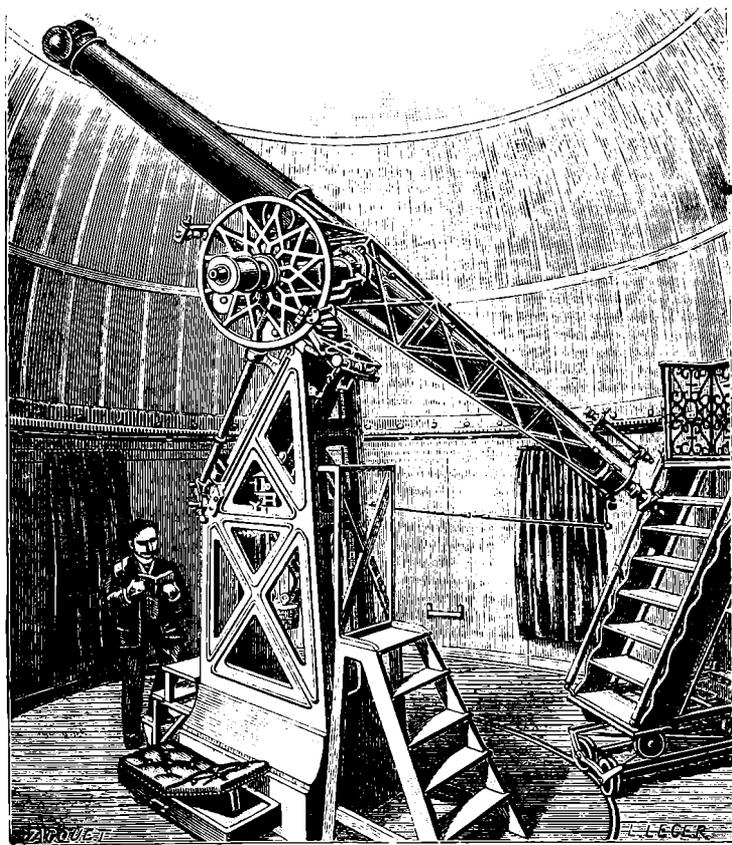


Fig. 620.

el caso de un ocular de Huygens). De este modo, el diafragma elimina los rayos que proceden de los puntos muy apartados del eje y que se verían con poca claridad e iluminación insuficiente.

Los anteojos astronómicos de mucho aumento tienen muy poco campo, y son incómodos para buscar un astro: por esto se coloca sobre el tubo principal del anteojo otro pequeño llamado *explorador*, cuyo eje óptico está dispuesto paralelamente al del grande. Se explora el cielo con ese auxiliar, que aumenta menos, pero que tiene mayor campo; después se observa con el anteojo, cuyo eje se encuentra colocado necesariamente en la dirección del objeto.

592. **Claridad en los anteojos.** — Llámaso claridad de un anteojo la relación entre las cantidades de luz (162) que inciden, en un tiempo dado, sobre la imagen retiniana de un objeto en la visión a través del anteojo y en la visión a simple vista. Para calcular la claridad, supondremos, como sucede en los anteojos bien construidos, que el diámetro del disco ocular es inferior, o, a lo sumo, igual al diámetro de la pupila del ojo del observador, de manera que toda la luz que entra en el anteojo penetra en el ojo que observa.

1º *Caso de las estrellas.* — En este caso, el diámetro aparente del objeto, observado a

simple vista o con el anteojo, es nulo; la imagen puede considerarse como un punto. Entonces, la claridad es la relación entre la cantidad de luz que incide en el anteojo y la que incide en el ojo, en la observación a simple vista. Esta relación es evidentemente igual a la de las superficies del objetivo y de la pupila. Sea y el diámetro del objetivo, p el de la pupila y c la claridad. Tendremos :

$$c = \frac{y^2}{p^2};$$

continúa siendo mucho mayor que p , por lo cual c es mucho mayor que 1, es decir, que

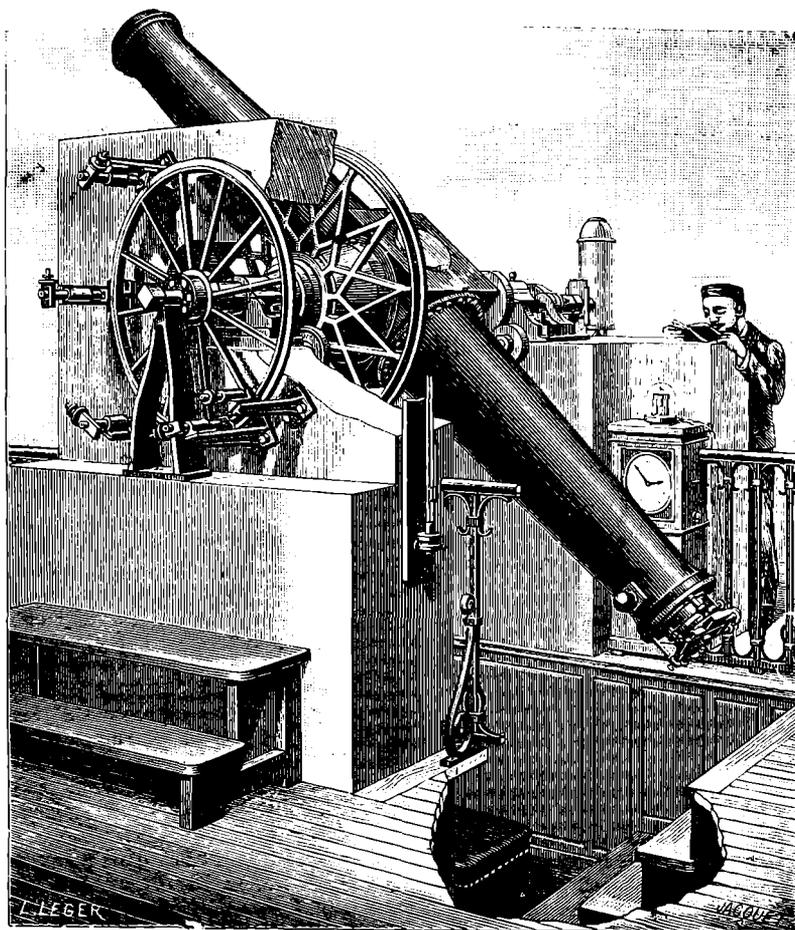


Fig. 621.

la estrella aparece mucho más brillante observándola con el anteojo que a simple vista.

Por esta razón, con los anteojos se ven estrellas que, a simple vista, son invisibles.

2º Caso de un objeto que tiene un diámetro aparente. — Este es el caso de los planetas. La relación entre las cantidades de luz que inciden en el ojo, cuando mira por el anteojo, y las que inciden, en la observación a simple vista, continúa siendo $\frac{y^2}{p^2}$; pero, llamando G al aumento lineal, la superficie de la imagen retiniana en la visión a través del aparato será G^2 veces mayor que en la visión a simple vista. La relación entre las cantidades de luz que caen en la unidad de superficie de la imagen retiniana es, en ambos casos :

$$c' = \frac{y^2}{p^2} \cdot \frac{1}{G^2}.$$

Y, designando por y' el diámetro del disco ocular, tendremos $G = \frac{y}{y'}$;

de donde

$$c' = \frac{y'^n}{p^n}.$$

Y, como y' es menor o, a lo sumo, igual a p , se ve que la claridad es inferior o, a lo sumo, igual a 1, es decir, que, en general, el objeto parece menos brillante mirándolo con el antejo que a simple vista.

Así se comprende que los antejos permitan ver las estrellas en pleno día; puesto que se aumenta el brillo de éstas, mientras que el del cielo, que puede considerarse como objeto dotado de diámetro aparente, se debilita.

OBSERVACIÓN. — Los cálculos precedentes suponen que toda la luz que hiere el objetivo, atraviesa el círculo ocular; pero en realidad gran cantidad de esta luz no llega a él, porque la reflejan las superficies de las lentes, o la absorbe el vidrio. Esto disminuye la claridad.

593. Instrumentos meridianos y ecuatoriales. — El antejo astronómico es el órgano esencial de los *instrumentos meridianos*, así como de los *ecuatoriales*.

Un *círculo meridiano* está constituido por un antejo que puede girar al rededor de un eje horizontal, y por un *círculo* perpendicular al eje, que le sirve de centro (fig. 621). El antejo comprende un retículo formado de un hilo horizontal y de otros varios perpendiculares al primero. Con esto instrumento se calculan sucesivamente en el momento de pasar un astro;

1° La hora del paso por el meridiano, anotando los instantes de los pasos sucesivos en los diferentes hilos verticales del retículo;

2° La altura del astro sobre el horizonte, por medio del círculo y de microscopios instalados de manera fija frente a su plano.

En un *ecuatorial* (fig. 620 y 622) el antejo tiene dos movimientos: uno, en un plano paralelo al eje del mundo, de tal manera que el eje óptico del antejo pueda formar con el eje del mundo un ángulo cualquiera, medido en el círculo C' (fig. 622); el otro es un movimiento cónico alrededor del eje del mundo. Este último se mide en un círculo C perpendicular al eje y cuyas divisiones pasan delante de un índice fijo. De manera que este círculo es paralelo al ecuador: por esto se llama *ecuatorial* el instrumento. El movimiento cónico se obtiene con ayuda de un *regulador* que le da duración igual a la del movimiento diurno. Esto permite al observador seguir continuamente un

astro, una vez que éste ha entrado en el campo.

Cada *ecuatorial* está resguardado por una *cúpula* que rueda sobre garruchas en torno de un eje vertical que pasa por el centro del instrumento. La cúpula presenta una abertura en forma de husillo (fig. 620), que se puede abrir por medio de trampas ventanas, llevándola, gracias a la rotación del conjunto, frente a la región del cielo que se desea observar.

594. Ecuatorial acodillado. — El *ecuatorial acodillado* permite al observador ver un punto cualquiera del cielo sin mudar de sitio, permaneciendo tranquilo en un gabinete, al abrigo de las intemperies del aire. A estas ventajas, tan preciosas para el observador, se agrega la de hacer inútiles las inmensas cúpulas tan caras, permitiendo reemplazarlas en caso necesario por un simple tinglado de madera, movable a lo largo de rieles en el momento de la observación: de tal manera que mientras el astrónomo está a cubierto, la parte óptica del instrumento (objetivo y espejo) se hallan al aire libre. M. Læwy ha imaginado o instalado en el Observatorio de Paris un instrumento de esta clase (fig. 623).

M. Læwy ha obtenido este resultado gracias a una ingeniosa combinación de superficies ópticas, refringentes y reflectoras.

El tubo que sostiene el objetivo se encuentra fijo perpendicularmente al eje del mundo y puede girar en torno suyo. Este tubo lleva una abrazadera que sostiene el espejo M (fig. 624), con inclinación de 45° y móvil en torno del eje del tubo. Si este espejo se encuentra frente a una estrella cuya dirección sea perpendicular al eje del tubo, los rayos

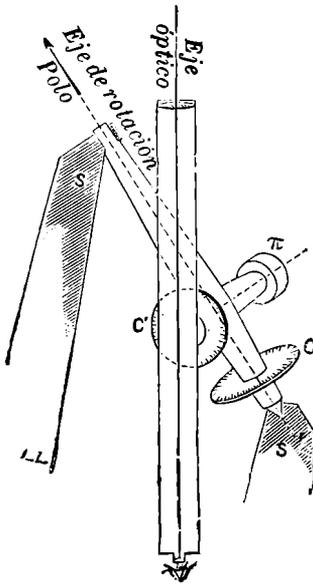


Fig. 622.

de la misma serán dirigidos en el anteojo paralelamente a dicho eje: pero cuando llegan al centro del instrumento, tropiezan con otro espejo M' , que tiene 45° de inclinación, y que los refleja en la dirección del eje del mundo sobre el ocular colocado delante de la

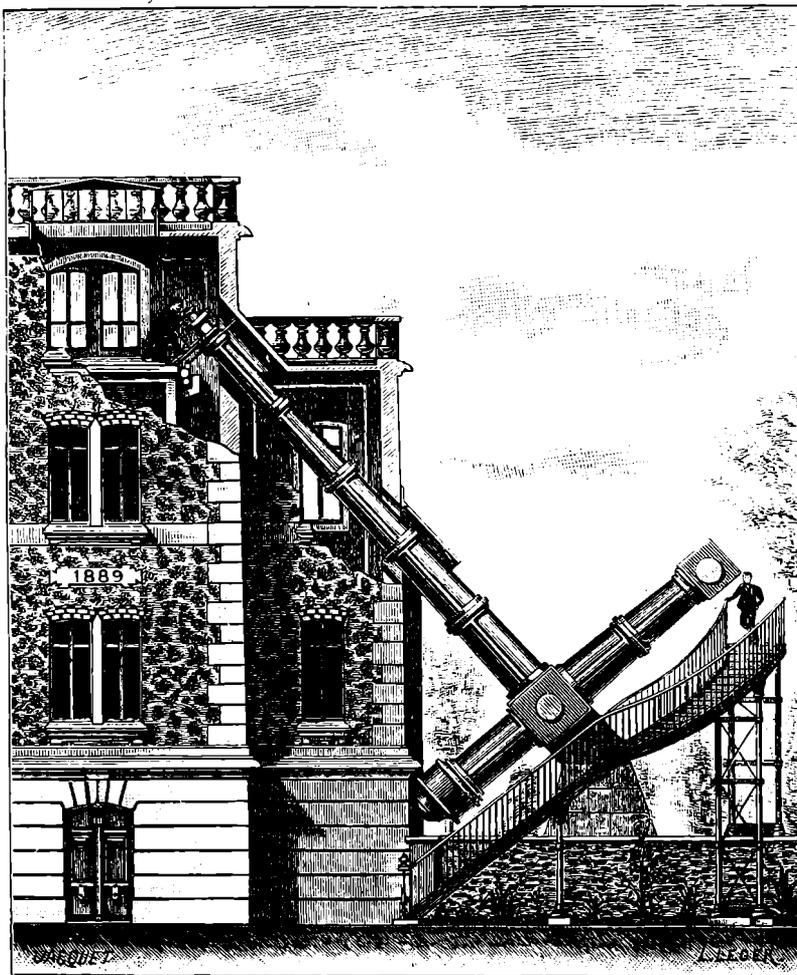


Fig. 623.

vista del observador. Gracias a este doble movimiento del tubo objetivo alrededor del eje del mundo y del espejo en torno del tubo, se puede enviar sobre el campo al astro que se quiera.

595. **Anteojo terrestre.** — El defecto del anteojo astronómico es el dar imágenes invertidas. Por otra parte, esto no es un inconveniente para la observación de los astros. *El anteojo terrestre o de larga vista* se distingue del astronómico en que produce imágenes rectas. Obtiénese imágenes rectas por medio de un sistema de dos vidrios convergentes O_1 y O_2 (fig. 625), de igual distancia focal, que se llama el *vehículo*. Están colocados en el mismo tubo que el ocular. El vidrio anterior O_1 debe tener su foco principal en el plano mismo, donde va a formarse la imagen aérea suministrada por el objetivo O .

Marcha de los rayos. — Sean OA' y OB' los ejes secundarios de las dos

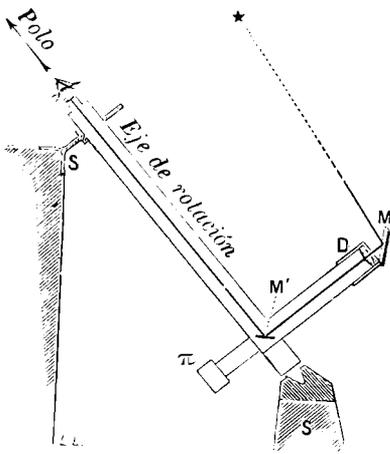


Fig. 624.

extremidades del objeto (que se supone colocado muy lejos) : el objetivo O suministra una imagen real e invertida $A'B'$. Los haces que divergen de la extremidad A' y de los demás puntos de la imagen aérea, se refractan de modo que cada uno de ellos sale paralelamente a su eje secundario respecto del vidrio O_1 ; y cada uno de estos haces paralelos encuentra en su camino la lente O_2 , que lo hace converger a su plano focal. De modo que se forma en A_1B_1 una imagen invertida de $A'B'$ y por consiguiente *recta* respecto del objeto. Y si se mira la imagen A_1B_1 con una lente O' , se ve una imagen $A''B''$ virtual y ampliada de A_1B_1 .

La construcción demuestra que A_1B_1 es igual a $A'B'$.

Aumento. — Se le define de la misma manera que en el anteojo astronómico y se le llega a obtener por la misma fórmula.

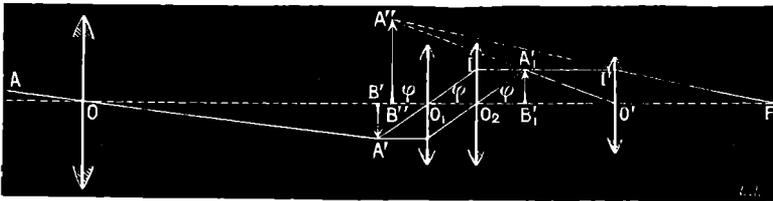


Fig. 625.

Ocular cuádruple u ocular terrestre. — El ocular de un anteojo terrestre es un negativo de dos vidrios,

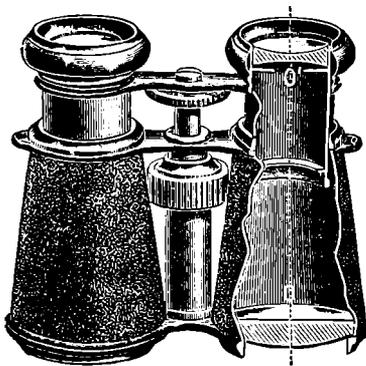


Fig. 626.

montados en el mismo tubo; de manera que el conjunto forme un *ocular de cuatro vidrios*, especial para el anteojo terrestre y llamado algunas veces *ocular terrestre*. Este ocular es de alargadera doble como el del anteojo astronómico : se efectúa el enfocamiento moviéndolo lentamente.

596. **Anteojo de Galileo.** — El anteojo de Galileo, o *gemelos de teatro*, sólo consta de dos sistemas de lentes (fig. 626) : el objetivo O que es una lente convergente acromática : el ocular O' ,

lente divergente también acromática. El cuerpo del anteojo se compone de un tubo grueso y corto, que lleva el objetivo, y en el cual puede

del punto A del objeto. De ahí resulta que la separación de las dos lentes es, poco más o menos, igual a la diferencia de sus distancias focales, y, por consiguiente, que el anteojo de Galileo es corto y portátil.

Posición del ojo. — Los haces luminosos que salen del ocular divergen apartándose del eje; ya no hay disco ocular real, y para distinguir más campo, el ojo debe aplicarse inmediatamente contra el ocular. Entonces su centro óptico está en C y ve la imagen A'' P'' bajo el diámetro aparente A''CP''. Pero siendo CO' muy pequeño, confundiremos A'' C P'' con A''O'P''.

Enfocamiento. — Para una vista normal, la imagen A'' P'' puede formarse en el infinito. Para esto es preciso que el foco f coincida con el punto P', foco del objetivo. Si, después, se acerca un miope, deberá bajar el ocular para que f se coloque más acá de P' y que la imagen A'' P'' se produzca en los límites de su visión.

En contra de lo que hemos expuesto al tratar del anteojo astronómico, el diámetro aparente de la imagen A'' P'' disminuye al enchufar el ocular, como se puede ver en los gemelos de teatro. Por lo tanto, un ojo miope no puede observar un objeto bajo un diámetro aparente tan grande como lo vería un ojo normal. Este fenómeno se explica fácilmente. En efecto, si se supone que el centro óptico del ojo se halla en O', el diámetro aparente de la imagen es el ángulo A''O'P'' igual al A'O'P'. Y como la imagen A' P' conserva una magnitud constante, se ve que, cuando se enchufa el ocular, el ángulo disminuye.

Aumento. — El valor máximo del aumento lo consigue, pues, un ojo normal que mire al infinito. Se demuestra fácilmente que aquél es igual a la relación de las distancias focales del objetivo y del ocular.

Cálculo del aumento. — Supongamos que el centro óptico del ojo coincide con el centro óptico O' (fig. 627) del ocular. Esta condición no puede cumplirse de modo absoluto; pero sí aproximadamente, toda vez que el ojo tiene que acercarse lo más posible al ocular. Sean α y α' los ángulos según los cuales se ve un mismo objeto con el anteojo y a simple vista. Podemos tomar, en vez de estos ángulos, sus tangentes, y, así, tendremos :

$$\alpha = \frac{A'P'}{O'P'} \quad \text{y} \quad \alpha' = \frac{A'P'}{OP'}$$

De donde,

$$G = \frac{\alpha}{\alpha'} = \frac{OP'}{O'P'}$$

OP' es la distancia focal F del objetivo : en cuanto a O'P', es, en general, superior a la distancia focal f del ocular. Por lo tanto, tendremos, en general, $G < \frac{F}{f}$. Pero, si los focos del ocular y del objetivo coinciden (caso de un ojo normal que mira sin acomodación), $OP' = f$ y, por consiguiente :

$$G = \frac{F}{f}$$

597. Antejos de prismas. — El anteojo de Galileo, que tiene la gran ventaja de ser corto y portátil, presenta el grave inconveniente de tener muy poco campo. Así, con un aumento igual a 3, el campo no es más que de 6°; y, para un aumento de 10, sólo es de 4°. Además, el aumento depende de la vista del observador; es pequeño, para los miopes. El anteojo terrestre, que ofrece las ventajas del anteojo astronómico, au-

mento constante y gran campo, presenta el inconveniente de ser demasiado largo, y, por tanto, poco transportable, en cuanto su aumento es algo grande. En 1850, el óptico Porro pensó en volver derecha la imagen del antejo astronómico, por medio de dos prismas de reflexión total convenientemente dispuestos y que, al mismo tiempo, permitiesen acortar considerablemente el antejo. Pero, tal idea no pudo ser realizada hasta estos últimos años, gracias a los perfeccionamientos introducidos en los sistemas ópticos.

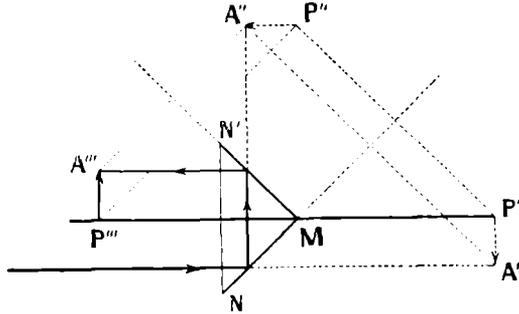


Fig. 629.

Principio de los antejos de prismas. — Sea $A'P'$ (fig. 629) la imagen dada por el

objetivo del antejo. Supongamos que, en el trayecto de los rayos, se interpone un prisma NMN' , cuyo ángulo en M es de 90° . Este prisma desempeñará el papel de dos espejos planos MN y MN' . Si el prisma fuese sustituible por estos dos, el espejo MN daría una imagen $A''P''$ de $A'P'$; y, luego, MN' daría de $A''P''$ una imagen definitiva $A'''P'''$ tal que $MP''' = MP'$. En realidad, el efecto de la refracción es acercar $A'''P'''$ a M . De todos modos, el efecto del sistema es reemplazar la imagen invertida $A'P'$ por una nueva imagen $A'''P'''$ que es recta. Pero, si la arista M del prisma es horizontal, la imagen no se vuelve recta

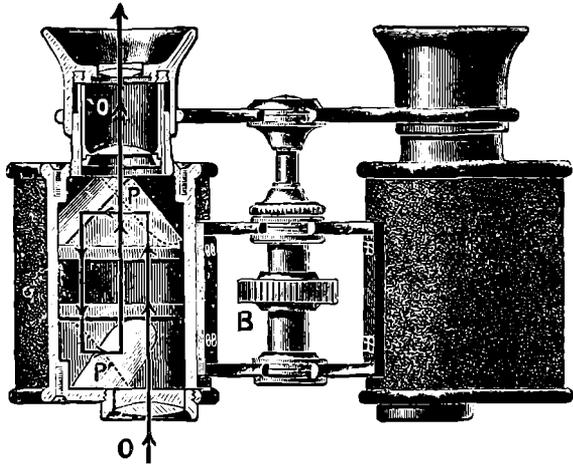


Fig. 630.

por completo y sólo se produce en sentido vertical. Por esta razón, debe hacerse reflejar otra vez la luz en un prisma semejante al primero, pero de arista vertical. Este prisma, acaba de enderezar, la imagen y dirige la luz hacia el ocular. La figura 630 representa

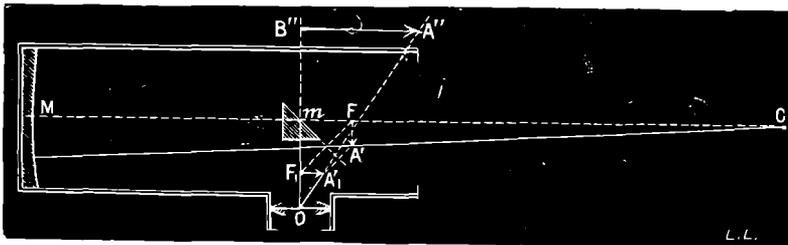


Fig. 631.

unos gemelos de prismas con la disposición de los elementos ópticos de uno de los antejos. El objetivo se halla en O , y en O' , el ocular; los prismas están en P y P' .

Se ha representado la marcha de un rayo que sigue primero el eje óptico del objetivo y luego se dirige según el eje óptico del ocular por 4 reflexiones sucesivas.

La longitud total del camino que recorre la luz es sensiblemente igual a la suma de las distancias focales del objetivo y del ocular, como en el anteojo astronómico. Pero

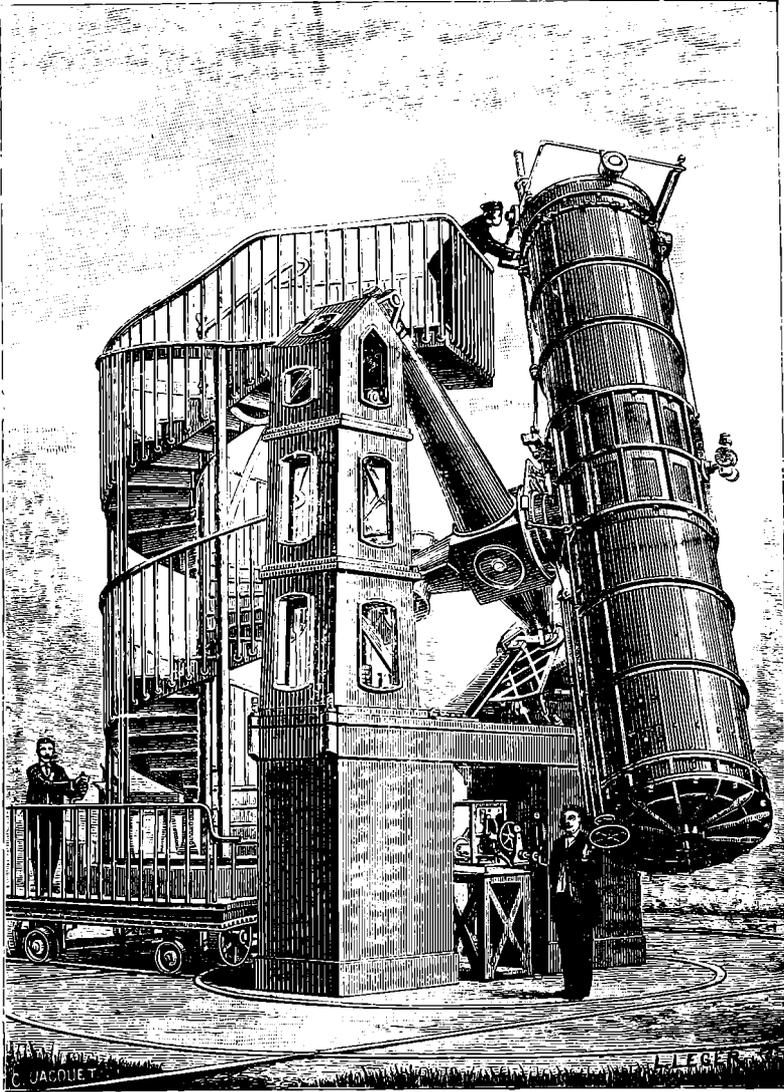


Fig. 632.

como este camino se recorre en zig-zag, resulta que la longitud del aparato es, aproximadamente, la tercera parte de la longitud de un anteojo astronómico de mismo objetivo y de mismo ocular.

598. — **Telescopio de Newton.** — El tipo de los *telescopios* o *reflectores* es el telescopio de Newton, que tiene por objetivo un espejo esférico cóncavo.

En M se encuentra el objetivo (fig. 631); los rayos del astro reflejados

una primera vez en M , son interceptados por el pequeño prisma m de reflexión total y reflejados de modo que la imagen $A'F$ es enviada a A'_1F_1 en posición simétrica de $A'F$ respecto del plano m prolongado. Se la mira con un ocular de mucho aumento O , que da por fin la imagen $A''B''$ virtual y muy ampliada.

Aumento. — El aumento se define, en los telescopios, lo mismo que en los anteojos.

Lo mismo que respecto del antejo, se demostraría que este aumento es igual al producto de la distancia focal F del objetivo, que, en este caso, es el espejo cóncavo, por la potencia del ocular, y por consiguiente es igual a $\frac{F}{f}$, cuando el ocular es una simple lente de distancia focal f y el centro óptico del ojo está en su foco, o cuando se mira al infinito.

599. **Telescopio de Foucault.** Habiendo logrado Foucault platear los espejos de vidrio y darles pulimento bastante perfecto para que pudieran reflejar 75 por 100 de la luz incidente, pensó en aplicar su método al telescopio de Newton. Su primer espejo no tenía más que 10 centímetros de diámetro; pero sucesivamente construyó otros de 22, de 33, de 42 y 80 centímetros.

Es evidente que estos objetivos no tienen ninguna aberración de refrangibilidad. Cuanto a las de esfericidad, Foucault logró hacerlas desaparecer transformando el espejo esférico en parabólico por los *retoques locales*. De este modo, se puede emplear un ocular muy potente.

Gran telescopio del Observatorio de Paris. — El aparato representado en la figura 632 tiene un espejo plateado de 1 m. 20 de diámetro y una distancia focal seis veces mayor, o sea de 7,20 metros.

CAPÍTULO IX

RADIACIONES

DISPERSIÓN

600. **Espectro solar.** — Hagamos incidir en un prisma un haz de rayos solares (fig. 633).

Estos forman en seguida en una pantalla una serie de colores (lámina de color, 1) que forman el *espectro solar*. Este fenómeno se llama *dispersión de la luz*. A estos colores se les han dado diferentes nombres, que son, comenzando por el más desviado : *violado*,

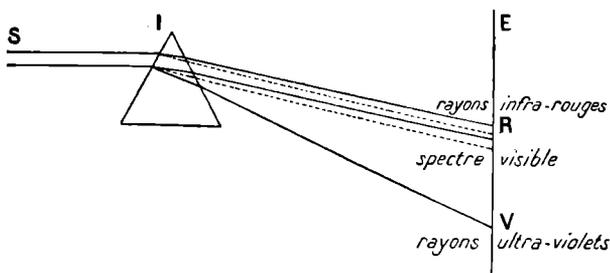


Fig. 633.

añil, *azul*, *verde*, *amarillo*, *anaranjado*, *rojo*.

601. **Teoría de Newton.** — La formación del espectro solar se explica por una hipótesis de Newton, según la cual la luz blanca del sol contiene una infinidad de luces que el prisma desvía desigualmente, porque tienen índices de refracción diferentes, aumentando del rojo al violado. Dicese que estas luces son *desigualmente refrangibles*.

Esta hipótesis se confirma por el experimento siguiente : Se hace incidir el espectro en una pantalla con un agujero que sólo deja pasar una pequeña parte. Si hacemos pasar estos rayos por un segundo prisma B (fig. 634) vemos una simple refracción sin dispersión. Además, haciendo girar el prisma A, nótase que las radiaciones que hacemos

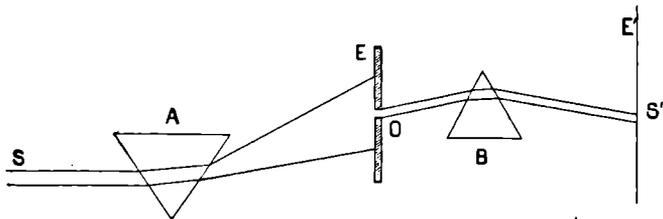


Fig. 634.

pasar sucesivamente por el agujero O, son desviadas desigualmente por el prisma B; los rayos violados son más desviados que los rojos.

602. **Rayos infra-rojos y ultra-violados.** — **Radiaciones.** — Si se aplica al espectro un termómetro muy sensible, *pila termoeléctrica, bolómetro, radiómetro* (241) se observa que se calienta.

También se nota calor debajo del rojo, y así se dice que hay rayos invisibles, llamados *rayos infra-rojos*. Como el cristal los absorbe, se observan mejor con un prisma de sal gema o de fluorina.

El termómetro indica también calor, pero muy poco, más allá del violado, probando así la existencia de rayos invisibles, llamados *ultra-violados*. Para evidenciarlo, debe usarse un prisma de cuarzo, porque el cristal absorbe la mayor parte de estos rayos.

Acciones fotográficas de los rayos del espectro. — Si se hace incidir el espectro completo en una placa fotográfica, se observa, después de revelada, que no ha habido impresión en la parte infra-roja, y muy poca en la roja, amarilla y verde del espectro; pero en cambio se nota fuerte impresión en las partes azul, violada y ultravioletada. Por consiguiente, puede usarse la fotografía para estudiar la parte ultravioletada del espectro.

Radiaciones. — Dicese que el espectro solar se compone de *radiaciones simples*, divididas en tres categorías : las radiaciones visibles, las infra-rojas y las ultra-violadas.

603. **Aberración de refrangibilidad.** — Cuando una lente convergente recibe un haz de luz blanca paralela a su eje, los rayos rojos, que son los menos refrangibles, van a formar su foco principal en un punto *r* (fig. 635), mientras que los violados se reúnen en otro más próximo *v*. Entre estos dos límites se forman los focos de las radiaciones intermedias. Esto es lo que se llama *aberración de refrangibilidad* o *aberración cromática*. De aquí resulta que los contornos de las imágenes dadas por

la lente parecen poco netos y teñidos de color : por eso se dice que la imagen aparece *irisada*.

604. **Acromatismo.** — Combinando lentes formadas de sustancias diferentes y cuyas curvas estén convenientemente calculadas, se ha conseguido refractar la luz blanca sin dispersarla. Las imágenes dadas por estas lentes no parecen irisadas : dicese que estos sistemas refringentes son *acromáticos*, y se da el nombre de *acromatismo* a la supresión de la aberración por refrangibilidad.

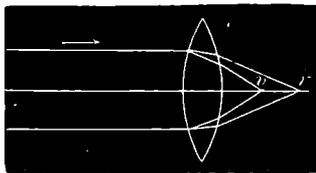


Fig. 635.

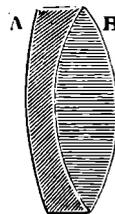


Fig. 636.

Dollon, óptico de Londres, fué el primero que demostró, en 1757, que yuxtaponiendo dos lentes, una biconvexa de crown-glass y la otra cóncavo-convexa de flint (fig. 636), se obtiene una lente sensiblemente acromática.

CALOR RADIANTE

605. **Propagación del calor por radiación. Analogía con la luz.** — El calor se propaga no sólo por conductibilidad, sino también por *radiación* con gran velocidad. Así, el calor del sol llega hasta nosotros atravesando el vacío de los espacios interplanetarios y el aire atmosférico sin calentar a éste sensiblemente*.

La propagación del calor por radiación parece instantánea. Si, por ejemplo, se levanta bruscamente la trampilla de una chimenea con fuego, la persona que esté cerca sentirá inmediatamente sensación de calor, aunque esté frío el aire de la habitación.

Luego la propagación del calor radiante tiene analogía con la de la luz. Hay motivo para pensar que *la velocidad de propagación del calor radiante es igual a la de la luz*; pero hasta ahora no se ha hecho ningún experimento directo para demostrarlo.

Lo que sigue de este capítulo probará que no sólo hay analogía, sino completa identidad entre el calor radiante y las radiaciones del espectro*, siendo cada radiación una especie particular de calor radiante,

Luego puede decirse también que *la luz no es más que calor radiante* : es calor luminoso, que se distingue del calor obscuro — el emitido por un vaso lleno de agua caliente, por ejemplo, — especialmente porque el primero impresiona nuestra vista.

606. **Cuerpos diatérmicos y atérmicos.** — Los cuerpos que se dejan atravesar por el calor radiante se llaman *diatérmicos*. Se conocen en

* En efecto, las regiones superiores de la atmósfera se hallan a temperatura muy baja y el suelo, calentado por los rayos solares, eleva la temperatura del aire que está en contacto con él.

** Por esta razón colocamos lógicamente el estudio del calor radiante con el de las radiaciones.

que, cuando se interponen entre un foco de calor y un termómetro, no impiden que suba la temperatura de éste. No existen cuerpos perfectamente diatérmanos. Los cuerpos que se dejan penetrar por el calor, absorben parte de él y se calientan.

Además, el poder diatérmano de un cuerpo depende de la especie de calor que recibe. Así, una lámina gruesa de vidrio, que es diatérmana para el calor luminoso, absorbe las radiaciones oscuras.

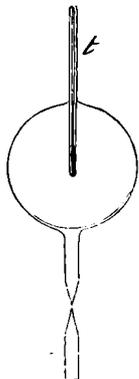


Fig. 637.

Los cuerpos diatérmanos para las radiaciones visibles son los llamados *transparentes*.

Los cuerpos que no dan paso al calor radiante se denominan *atérmanos*.

Experimento de Rumford. — Sólo el vacío es perfectamente diatérmano para todas las radiaciones. Esto se prueba directamente soldando un termómetro a un matraz donde se haya efectuado el vacío (fig. 637). Tan pronto como se mete el matraz en un vaso que contenga agua caliente, o si se coloca cerca de un foco de calor, el termómetro sube instantáneamente. Luego sólo por radiación ha podido propagarse el calor al termómetro, puesto que

el vidrio es mal conductor para que se efectue tan rápida propagación por las paredes.

607. Propagación del calor radiante. — Si entre un pequeño foco de calor y un termómetro sensible se interpone un cuerpo atérmano, se observa que el calor queda interceptado si la pantalla se encuentra en la recta que une el foco con el termómetro; pero no sucederá así, si la pantalla está fuera de dicha recta. De aquí se deduce que el calor radiante se propaga, como la luz, en un medio homogéneo, siguiendo direcciones rectilíneas que podemos llamar *rayos caloríficos*. Si en el trayecto del calor emitido por un foco pequeño interponemos una pantalla con un agujero, podremos limitar un *haz de rayos caloríficos*.

608. Intensidad del calor radiante. — **1ª LEY.** — *La cantidad de calor que un foco calorífico radia normalmente sobre una superficie determinada, varía en razón inversa del cuadrado de la distancia de esta superficie al foco.*

Una cantidad determinada de calor radiante representa cierta cantidad de energía; así se puede demostrar *a priori* la ley anterior, lo mismo que se ha hecho con el sonido (421) y la luz (462); también se prueba por el experimento.

2ª LEY. — *La cantidad de calor que un foco constante envía oblicuamente a una superficie determinada, es proporcional al coseno del ángulo que forman los rayos incidentes con la normal a esa superficie.* Esta ley puede demostrarse teóricamente como para la luz (462).

609. — Reflexión y difusión del calor radiante. — **LEY.** — *El calor radiante se refleja según las mismas leyes que la luz.* — En efecto, si se hace incidir en un espejo un rayo procedente de un foco que sea al mismo tiempo calorífico y luminoso, se observa que el calor se encuentra en la misma dirección que el rayo luminoso reflejado.

Lo mismo ocurre con el calor de un foco obscuro. Esto se puede demostrar determinando la posición de la imagen de una bujía en un espejo cóncavo y sustituyendo la bujía por una bolita metálica muy calentada. Así se verá que, colocando un termómetro en el mismo sitio donde se formaba la imagen de la bujía, éste sufre un efecto mayor que en cualquier otro punto inmediato.

Lo cual explica que en el foco de un espejo cóncavo vuelto hacia el sol se concentre un calor tal que se pueden inflamar cuerpos combustibles. De ahí proviene el nombre de *foco*.

Experimento de los espejos ustorios. — Se colocan dos espejos cóncavos

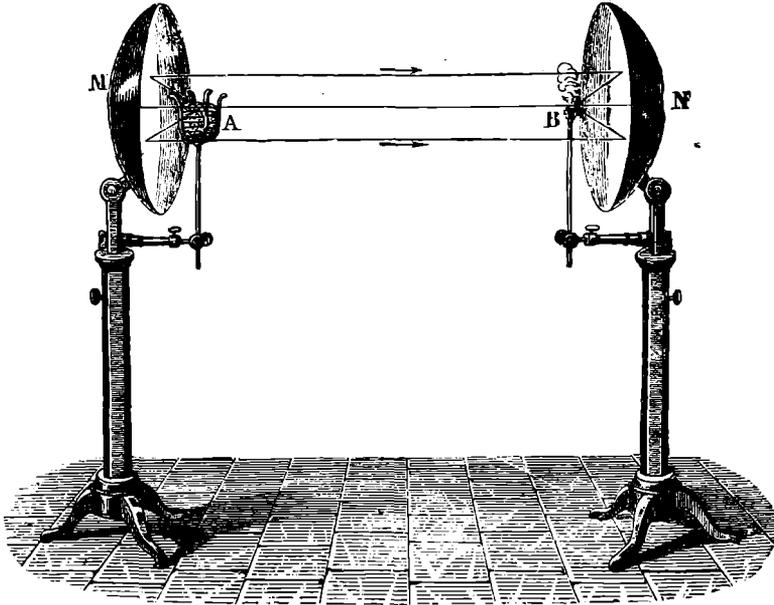


Fig. 638.

de metal MN (fig. 638) a 405 metros de distancia, de manera que coincidan sus ejes. En el foco de uno de ellos se pone un foco de calor, por ejemplo una cestilla de alambre A llena de carbones incandescentes; en el foco del otro, en B, se pone un poco de algodón fulminante. Los rayos que emite el foco A se reflejan una vez en el espejo M, paralelamente al eje; después van a reflejarse otra vez en el otro reflector, concurriendo en su foco B, como lo prueba el que el algodón se enciende, mientras que, fuera del foco, no ardería. Este experimento es análogo al que hemos visto (427) al tratar del sonido.

Difusión. — Un cuerpo mate difunde el calor radiante en todas direcciones, lo mismo que la luz.

610. — **Refracción y dispersión del calor radiante.** — Hagamos incidir en un prisma un haz de rayos solares que atraviesen un vidrio rojo: así se notará que, en el trayecto del haz refractado al salir del prisma, hay calor; pero que no lo hay en los demás puntos contiguos: luego el calor se refracta con arreglo a las mismas leyes que la luz.

También puede demostrarse la refracción de un haz de rayos caloríficos oscuros, haciéndolos pasar por un prisma de sal gema, que es la sustancia más diatérmana para las radiaciones oscuras.

A consecuencia de la refracción concéntrase el calor, como la luz, en el foco de una lente convergente, vuelta hacia el sol. De este modo se puede prender fuego a materias combustibles.

El prisma, no sólo desvía el calor radiante, sino que lo dispersa, probando así que el calor que radia un foco es complejo, y que se compone de radiaciones desigualmente refrangibles.

611. Identidad del calor radiante y de las radiaciones del espectro.

— Las propiedades del calor radiante son idénticas a las de las radiaciones del espectro. Así, la luz y el calor de un rayo solar que atraviesa un vidrio rojo, se propagan siguiendo la misma dirección, con igual velocidad, y no pueden ser separados por cualquier número de reflexiones y refracciones. Asimismo, las reflexiones y refracciones que debilitan la intensidad de la luz, debilitan el calor en *igual proporción*. De aquí se deduce necesariamente que el calor y la luz que se propagan siguiendo ese rayo, son dos efectos de la misma causa.

Si el rayo puede procurarnos dos órdenes de sensaciones diferentes, calor y luz, es debido a los órganos distintos que lo reciben. Cuando incide en las ramificaciones nerviosas de la piel, produce impresión de calor; cuando impresiona la retina, vemos luz. De la misma manera, si tocamos con el dedo un cuerpo sonoro, éste nos comunica una sensación táctil muy diferente de la sensación sonora que se siente por medio de nuestro nervio auditivo: sin embargo, ambas sensaciones tienen la misma causa, la vibración del cuerpo sonoro.

La magnitud de la desviación del calor radiante oscuro, por un prisma, prueba además que este calor está formado únicamente de radiaciones infra-rojas.

612. **Radiación en un recinto cerrado.** — Supongamos varios cuerpos colocados en un recinto cerrado, impenetrable al calor (recinto *adiabático*). Cada uno de ellos, sea cual fuere su temperatura, radia calor*. Si todos los cuerpos no están, al principio, a la misma temperatura, sabido es que los más calientes se enfrían, mientras que los más fríos se calientan. Luego éstos últimos radian menos calor que el que reciben. Al cabo de cierto tiempo, todos los cuerpos han adquirido la misma temperatura. Entonces siguen radiando, pero cada uno de ellos absorbe tanto calor radiado por los otros cuerpos como pierde él mismo por radiación. (*Equilibrio móvil de temperaturas*, de Prevost).

Si se hace un agujero en el recinto, sale parte de la radiación: más adelante estudiaremos estas propiedades.

613. **Cuerpos negros.** — **Energía de la radiación.** — Llámanse *cuerpo negro* al que absorbe completamente todas las radiaciones, es decir que no refleja, ni difunde ni deja pasar ninguna. El negro de humo cons-

* En efecto, se debe admitir que los cuerpos más fríos (siempre que su temperatura este sobre cero absoluto) radian calor, puesto que pueden calentar otros cuerpos más fríos que estén a su lado.

tituye *aproximadamente* un cuerpo negro; porque si bien es perfectamente opaco para las radiaciones visibles, no lo es para ciertas radiaciones invisibles.

Cualquier recinto cerrado que sólo tenga una pequeña abertura constituya un cuerpo completamente negro para toda radiación que penetre en su interior. En efecto, en el interior del recinto, esta radiación sufre un gran número de reflexiones o difusiones, que acaban por absorberla del todo.

Energía y potencia de una radiación. — Si, en un cuerpo negro, incide una radiación, la absorbe enteramente, *lo calienta y no produce ningún otro fenómeno.*

La radiación absorbida ha sido, pues, reemplazada por energía calorífica; de donde se deduce que *una radiación lleva consigo energía.*

La energía de una radiación puede medirse haciéndola incidir en una pila termoeléctrica, radiomicrometro, ó en un bolómetro cubiertos con negro de humo para que absorban enteramente la radiación. La indicación del aparato es proporcional a la cantidad de calor que ha recibido, por segundo; así permite medir la energía comunicada por la radiación en un segundo, es decir la potencia de la radiación. Esta potencia se calcula en vatios.

La propiedad de transportar energía es común a todas la radiaciones, visibles o invisibles. Ya sabemos que no sucede así con la propiedad luminosa, ni la de producir reacciones químicas.

614. Teoría ondulatoria. — Longitud de onda de las radiaciones. — Es general creencia que las radiaciones son producidas por movimientos vibratorios sumamente rápidos, que se propagan en un medio llamado *éter*. Este medio llena el vacío y los intervalos moleculares de los cuerpos transparentes. Cada radiación está caracterizada por su frecuencia o por su longitud de onda en el aire. La longitud de onda del violado extremo es de $0\mu,4$, la del rojo extremo es de $0\mu,8$. Las infra-rojas tienen longitudes de onda más grandes que $0\mu,8$. En estos últimos años, Rubens y Wood han aislado y estudiado infra-rojas cuya longitud de onda llega a 314μ . Las ultra-violadas tienen longitudes más pequeñas que el violado; las hay desde $0\mu,1$ (estudiadas por Shumann) hasta $0\mu, 4$.

EMISIÓN DE LAS RADIACIONES. — ESPECTROS DE EMISIÓN.

615. Estudio de las radiaciones emitidas por los diversos focos. — Espectros puros. — Si se hace incidir en un prisma las radiaciones emitidas por un foco cualquiera, se obtiene un espectro que contiene, separadas, las diversas radiaciones emitidas simultáneamente por el foco. Para estudiar los diversos focos y la misma radiación solar, no basta el procedimiento descrito antes (600). En efecto, cada radiación produce en la pantalla una mancha de anchura igual a la del haz incidente, y las manchas sucesivas, producidas por las diferentes radiaciones, se mezclan unas con otras. En la figura 633 se ha trazado con

línea de puntos la marcha del haz formada por una radiación algo más refrangible que el rojo extremo : se ve que, en la pantalla, se confunde parcialmente con esta radiación roja.

Para obtener un espectro puro, debe hacerse penetrar la luz del foco S a través de una pequeña abertura F (fig. 639), paralela a la arista del prisma, y colocar en el trayecto una lente convergente acromática L , para formar una imagen real F' de esta abertura. Detrás de dicha lente se pone el prisma que desvía más o menos las diversas radiaciones del haz inicial. El prisma se debe colocar en la posición que produzca la desviación mínima para la radiación de refrangibilidad media. De este modo produce en la pantalla una serie de imágenes claras de la abertura a la misma distancia del prisma que F' . El número de estas imágenes es igual al número de radiaciones simples contenidas en la radiación del foco que ilumina la abertura.

Sin embargo, si el foco S produce radiaciones simples de refrangibilidad muy diferentes, las imágenes que dan estas radiaciones simples no pueden ser claras al mismo tiempo. Para el estudio completo del conjunto,

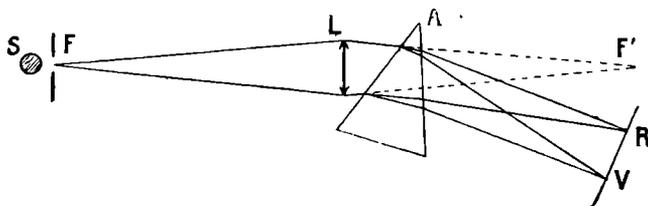


Fig. 639.

debe colocarse el prisma en el mínimo de desviación sucesivamente para grupos de radiaciones determinadas.

Empleo de una red. — La red ordinaria está formada de una lámina de vidrio estriado de trazos paralelos muy juntos. Ya veremos más adelante que este sistema es capaz de descomponer las radiaciones complejas. Esto se demuestra poniendo la red donde está el prisma A (fig. 639), normalmente al haz LF' e iluminando F con luz blanca, por ejemplo. Así se ve todavía en F' una imagen blanca de la abertura; pero, de una y otra parte, se producen espectros que se van separando cada vez más de F' con su parte violada hacia ese punto. Luego una red desvía tanto menos una radiación, cuanto menos refrangible sea ésta. Los primeros espectros luminosos están separados distintamente; pero los siguientes se confunden unos con otros y dan lugar a mezclas complejas de diversas radiaciones.

Redes cóncavas de Rowland. — Éste es el primero que ha construido redes cóncavas formadas de un espejo cóncavo metálico estriado de trazos paralelos. Cuando se coloca en el centro de curvatura del espejo una abertura iluminada por luz blanca, fuera de la luz blanca que llega a esta abertura, se descubren espectros sucesivos en el plano perpendicular al eje principal, con el violado vuelto hacia el centro. Esta disposición tiene la gran ventaja de no interponer ningún medio absorbente

en el trayecto de las radiaciones. De este modo se obtienen los espectros más perfectos.

616. Espectroscopios.

— Los sistemas precedentes no convienen para focos poco intensos. Entonces hay que emplear un espectroscopio. El más corriente (fig. 640 y 641) se compone de una abertura vertical F, colocada en el plano focal de una lente acromática (el conjunto forma el *colimador*) e iluminada por el foco que se estudia. A la salida de la lente, cada punto de la abertura da

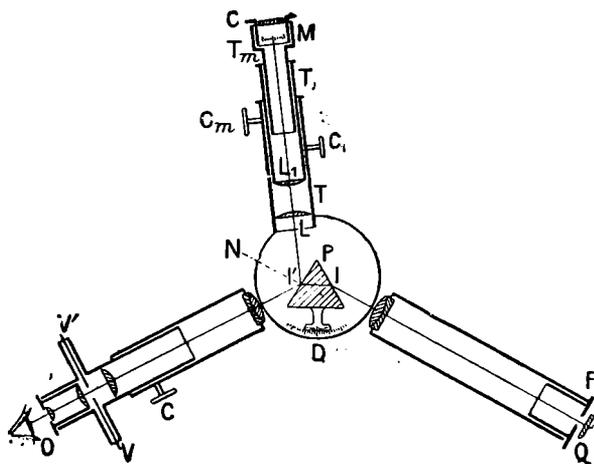


Fig. 640.

un haz de rayos paralelos que incide en la cara I de un prisma, cuya arista es vertical como la abertura; y a cada radiación simple que proporciona el foco, corresponde, al salir del prisma, otro haz, paralelo también y

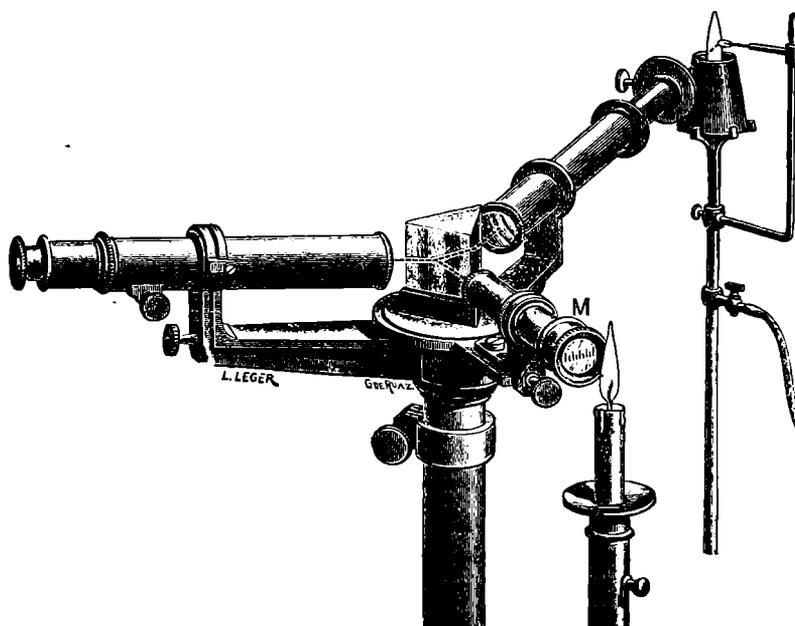


Fig. 641.

más o menos desviado. El conjunto de los diversos haces incide en el objetivo de un anteojos que, en su plano focal, produce un espectro real puro, que se mira por el ocular.

Para facilitar la comparación de los diversos espectros, se coloca en

M un *micrómetro* graduado, iluminado por una luz auxiliar : y, a través del anteojo, por reflexión en la cara I' , se ve una imagen del micrómetro que se superpone al espectro y que permite marcar sus diversas partes.

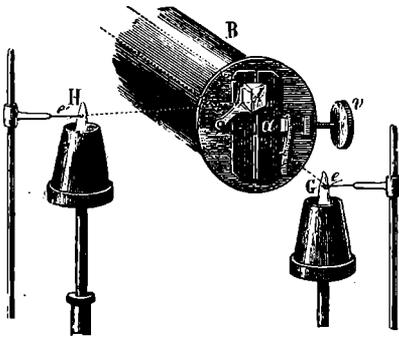


Fig. 642.

El conjunto se apoya en un pie que soporta la plataforma del prisma. El anteojo y el micrómetro pueden girar alrededor de un eje vertical que pase por el centro de la plataforma del prisma, y ésta, a su vez, puede girar en torno del mismo eje. De este modo se regula a voluntad el aparato.

La abertura es vertical y estrecha, y se abre más o menos, por medio de un tornillo.

Se pueden observar simultáneamente dos espectros colocando, en la parte superior de la abertura, un prisma i (fig. 642) de reflexión total, que envía al eje del colimador una de las luces observadas, mientras que otra penetra directamente por la otra mitad de la abertura.

Por medio de varios prismas que la luz va atravesando sucesivamente, constrúyense espectroscopios muy dispersivos.

Espectroscopio de M. de Gramont. — Cuando se emplea un espectroscopio ordinario es difícil identificar el espectro de una sustancia que se observa con el de la misma sustancia que se halla en los atlas, tales como el de Lecoq de Boisbaudran. Esto consiste en que los números de las divisiones que sirven para señalar las rayas no coinciden, entre sí, y en que las leyes de las dispersiones del prisma que se tiene y el que ha servido para formar el atlas no son iguales. M. de Gramont corrigió estos dos inconvenientes en un aparato construido para sus experimentos personales. En el tubo que lleva el micrómetro coloca una segunda lente, movable respecto de la primera (fig. 640), pudiendo así variar la magnitud de la imagen del micrómetro observada en el anteojo, y haciendo girar ligeramente el prisma; con lo cual se modifica la desviación de las rayas. Además, en VV' se ven dos viseras corredizas en el ocular O de la lente, que sirven para aislar en el campo una parte del espectro para observar las rayas débiles. Q es una placa de vidrio o cuarzo que protege la abertura F del polvo y los vapores corrosivos.

Regulación del espectroscopio. — Se separa el anteojo de observación del aparato y se le enfoca sobre un objeto muy distante; después, quitando el prisma, se le coloca en la prolongación del colimador, cuya abertura F se debe ver entonces con toda claridad si está en el foco principal de la lente del colimador. Después se ponen en su sitio el anteojo y el prisma y se les mueve en un sentido o en otro hasta que el espectro del foco luminoso se encuentre en el campo del anteojo. Por fin se pone el prisma cerca del *mínimum* de desviación.

Otros espectroscopios. — I. *Espectroscopios de visión directa.* — Son aparatos cuyo anteojo se halla exactamente en la dirección del colimador.

Amici empleaba un *prisma múltiple*, compuesto de uno de flin-glass, colocado entre dos de crown.

Hoffmann construyó, después, un prisma múltiple compuesto de cinco prismas (fig. 643); F y F' son de flint, C , C' y C'' , de crown. En estos prismas no se desvían los rayos amarillos: los rojos lo efectúan en un sentido y los violados, en el contrario.

II. *Espectroscopios de redes.* — En un espectroscopio se puede reem-

plazar el prisma por una red, dejando los otros dos órganos esenciales, el colimador y el anteojo.

III. *Espectrógrafos*. — La mayor parte de los trabajos contemporáneos sobre la espectroscopia se verifican por la fotografía. Los aparatos arreglados para este fin se denominan *espectrógrafos*. En principio, este aparato está dispuesto como un espectroscopio, sólo que el ocular del anteojo está reemplazado por una cámara oscura fotográfica. También se suele emplear una red cóncava que no absorbe las radiaciones invisibles y que puede dar una dispersión considerable (Rowland ha obtenido así un espectro solar de longitud total igual a 13 metros.)

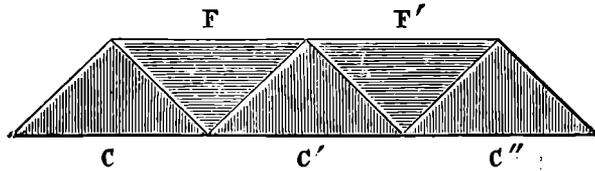


Fig. 643.

Las placas fotográficas ordinarias sólo son sensibles a los rayos de longitud de onda inferior a $0\mu,5$ (extremo del verde). Luego los estudios corrientes deberán hacerse a partir del extremo del verde. Sin embargo, con largas exposiciones y con placas de sensibilidad especial, se pueden fotografiar los colores amarillo, anaranjado y rojo.

La espectrografía conviene sólo para el estudio de los espectros en el ultra-violado; puesto que esta región es invisible. Entonces se emplean, a más de las redes cóncavas, espectrógrafos con lentes y prismas de cuarzo, de espato de Islandia o de fluorina.

La espectrografía conviene sólo para el estudio de los espectros en el ultra-violado; puesto que esta región es invisible. Entonces se emplean, a más de las redes cóncavas, espectrógrafos con lentes y prismas de cuarzo, de espato de Islandia o de fluorina.

617. **Graduación en longitudes de onda, de la escala de un espectroscopio.** — A causa de las diferencias existentes entre las leyes de dispersión de los diversos prismas, se acostumbra indicar, para toda radiación observada en el espectroscopio, no la división del micrómetro con la cual coincide, sino la longitud de onda de la radiación. Para esto, es necesario graduar el aparato en longitudes de ondas; y, con tal objeto, empléanse focos luminosos que produzcan espectros de líneas brillantes, cuyas longitudes de onda correspondientes nos son conocidas previamente. Por ejemplo, el hidrógeno, iluminado en un tubo de Plucker, proporciona un espectro en que existen tres rayas principales: la raya α (roja), de longitud de onda $0\mu,656$; la raya β (azul-verde), de longitud de onda $0\mu,486$, y la raya γ (violada), de longitud de onda $0\mu,434$.

Constrúyese un diagrama (fig. 644), en papel cuadrículado, y se trazan las longitudes de onda como abscisas y las divisiones del micrómetro, como ordenadas. Se unen los puntos hallados, por una curva que quedará tanto más determinada, cuantas más radiaciones conocidas se hayan empleado.

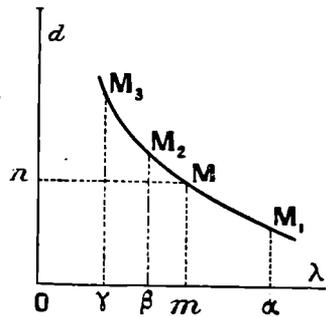


Fig. 644.

Si, luego, se observa una radiación en la división n del micrómetro, se busca en el diagrama el punto M correspondiente de la curva, λ su abscisa Om dará la longitud de onda desconocida de la radiación.

618. **Emisión de las radiaciones por los cuerpos. — Incandescencia. — Poder emisor.** — En general, un cuerpo frío emite radiaciones que no son luminosas. Estas son radiaciones infra-rojas. Si se eleva su temperatura, a los 600° aparecen rayos rojos: entonces, el cuerpo es

luminoso, y, en la oscuridad, parece rojo oscuro. Si se aumenta aún más la temperatura, las demás radiaciones visibles se añaden en el mismo orden que en el espectro solar, al par que las primeras aumentan de intensidad. Hacia los 1000° , el espectro luminoso es completo. Pasando de los 1000° , aparecen rayos ultraviolados.

Estos fenómenos pueden observarse fácilmente, colocando ante la hendidura de un espectroscopio, el filamento de una lámpara de incandescencia, el cual se somete a una corriente eléctrica de intensidad creciente. De este modo se observa la aparición sucesiva de todas las radiaciones.

Se ve, pues, que *un cuerpo sólido a temperatura elevada emite radiaciones que forman un espectro continuo*. Lo mismo ocurre con los líquidos a alta temperatura, tales como los metales en fusión.

El fenómeno de la emisión de radiaciones por un cuerpo a temperatura elevada, llámase *incandescencia*.

La emisión de radiaciones por incandescencia depende, en general, de la sustancia del cuerpo, salvo en el caso de un cuerpo completamente negro. Por ejemplo, si se calientan varios cuerpos a alta temperatura, igual para todos, el color de la luz emitida no es el mismo para todos

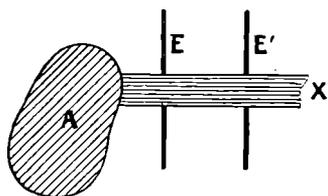


Fig. 645.

los cuerpos. Pero, si se observa el fondo de las cavidades practicadas en éstos, se verá que, entonces, las radiaciones emitidas son iguales en todos ellos. Ya hemos visto que el interior de una cavidad constituye un cuerpo absolutamente negro*.

Poder emisor de un cuerpo para una radiación dada. — Supongamos un cuerpo

A (fig. 645), instalado en un recinto que no le comunique ninguna energía apreciable, y supongamos, limitado por pantallas, un cilindro AX de rayos emitidos por el cuerpo. Llamaremos *poder emisor* del cuerpo en el cilindro, *para una radiación dada*, a la cantidad total de energía que transporta, en un segundo, la radiación considerada contenida en el cilindro; esa es, pues, la *potencia* de esa radiación en ese cilindro.

619. Ley de Stéfán. — *La energía calorífica total irradiada por un cuerpo negro es proporcional a la 4ª potencia de la temperatura absoluta del cuerpo.*

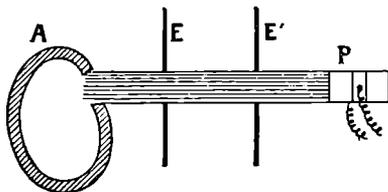


Fig. 646.

Esta ley, conocida con el nombre de ley de Stéfán, se establece por experimentación. Se hace incidir en una pila termoeléctrica o en un bolómetro la radiación emitida por una cavidad y so varía la temperatura de ésta.

Stéfán dedujo la ley del estudio de la radiación producida por un alambre de platino calentado eléctricamente. Boltzmann demostró que esta ley puede deducirse *a priori* de la

teoría electromagnética de la luz. Ha sido estudiada experimentalmente por varios fisi-

* El nombre *cuerpo negro* aplicado a un cuerpo incandescente parece bastante mal escogido. Guillaume ha propuesto reemplazarlo por el de *radiador integral*.

cos, entre los cuales citaremos a Kurlbaum, Lummer y Pringsheim, que la han comprobado en un gran intervalo de temperaturas.

Expresión de la ley de Stéfan. — Supongamos un cuerpo negro realizado por un recinto cerrado A (fig. 646), que contiene una pequeña abertura y se halla a la temperatura absoluta T. Limitemos por medio de pantallas a propósito, un haz paralelo de radiaciones, de S cm² de sección, y recibámosle en un segundo cuerpo negro P, que puede ser, por ejemplo, una cara de una pila termoeléctrica cubierta de negro de humo. Sea T' la temperatura absoluta de este último cuerpo. La cantidad de energía calorífica irradiada en un segundo de A a P se expresa en julios por la igualdad

$$Q = KS(T^4 - T'^4).$$

De las medidas de Kurlbaum, de Fery y de Gerlach resulta que K se acerca a 6×10^{-12} .

La misma ley se aplica también a cuerpos distintos de los absolutamente negros: pero en este caso, el coeficiente K de la fórmula precedente es más pequeño y depende de la sustancia considerada.

620. **Distribución de la energía en el espectro.** — *Ley de Wien.* — Si se forma el espectro de un cuerpo negro a temperatura dada y si se pasa por él un bolómetro o una pila termoeléctrica lineal, desde el infra-rojo hasta el ultra-violetado, se nota que la indicación del aparato varía, y es máxima en una radiación determinada.

Los espectros de los prismas no dan resultados concordantes sobre esto punto, porque no todas las sustancias tienen la misma ley de dispersión: en consecuencia, en los espectros dados por prismas de naturaleza diferente, las separaciones relativas de las diferentes radiaciones son desiguales. Se comprende, pues, que, si en un espectro, ciertas radiaciones, las rojas, por ejemplo, están más apretadas que en otro, producirán mayor cantidad de calor en el bolómetro. Por esto, conviene relacionar todas las observaciones con un *espectro normal*, cuyas desviaciones son proporcionales a las longitudes de onda de las radiaciones.

Además, estos espectros los proporcionan directamente los aparatos conocidos con el nombre de *redes* (675).

Si se varía la temperatura del cuerpo negro cuyo espectro se estudia, se ve que la radiación que ofrece el máximo de potencia es tanto más refrangible cuanto más elevada es la temperatura del cuerpo. Es decir, que la posición del máximo se encuentra, en el espectro, tanto más próxima al violetado cuanto más elevada es la temperatura del cuerpo.

Ley de Wien. — En la radiación de un cuerpo negro, la longitud de onda de la radiación que tiene el máximo de potencia es inversamente proporcional a la temperatura absoluta del cuerpo negro.

Sea λ_m la longitud de onda de la radiación que ofrece el máximo de potencia y T, la temperatura absoluta del cuerpo negro. Tenemos

$$\lambda_m T = K.$$

K es una constante igual a 2940.

La figura 647 representa varias curvas que traducen la distribución de la potencia

en el espectro. Se obtienen tomando por abscisas las longitudes de las radiaciones y como ordenadas las cantidades de potencia que mide un bolómetro para las diversas radiaciones, cuando se mueve en un espectro cuyas desviaciones sean proporcionales a las longitudes de onda.

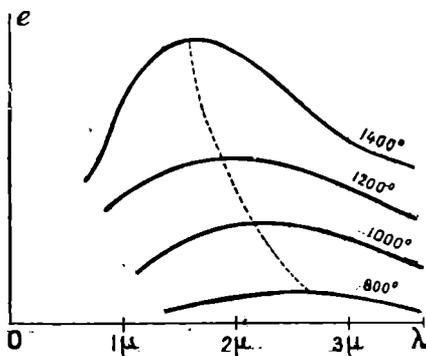


Fig. 647.

621. **Aplicaciones de las leyes de la incandescencia a los aparatos de alumbrado.** — Según lo que antecede, una proporción muy grande de la energía emitida por un cuerpo incandescente se halla en forma de radiaciones oscuras. La mayoría de los medios de alumbrado aprovecha el fenómeno de la incandescencia. En llamas como las del petróleo y gas, las partículas incandescentes de carbón son las que realizan el cuerpo que alumbrado; en las lámparas eléctricas de incandescencia, es el fila-

mento de carbón, y, en las de arco, son las puntas de los lápices de carbón.

Según la ley precedente, cuanto más elevada es la temperatura del cuerpo, más fuerte es la proporción de la energía total de la irradiación que se presenta bajo forma de radiaciones luminosas. Así, el arco eléctrico es el foco de luz más económico, porque es el más caliente. Del mismo modo, una lámpara eléctrica de incandescencia produce tanto mayor rendimiento cuanto más elevada sea la temperatura a que se someta el filamento de carbón.

Mechero Auer. — El poder de iluminación del gas del alumbrado ha aumentado notablemente en los mecheros de incandescencia inventados por Auer y Welsbach. En estos aparatos, antes de llegar el gas al quemador, se mezcla con aire, como en todos los aparatos de calefacción por gas (mecheros Bunsen, estufa de gas, etc.). Su llama está muy caliente; pero alumbrá muy poco. Colócase en ella una *camiseta*, formada por óxidos refractarios, la cual es sometida a muy elevada temperatura.*

Se ha probado que la composición más conveniente para la camiseta contiene de 98 a 99 por 100 de óxido de torio con 1 o 2 por 100 de óxido de cerio, al cual se añaden también otras diversas tierras raras. Para dar consistencia a la camiseta se le adicionan óxido de magnesio y aluminio. Para fabricarla, se la forma primero con una especie de algodón o ramío*; se impregna de una solución que contenga nitratos de los metales cuyos óxidos deban constituir la camiseta, y se calcina luego en un horno especial. A fin de poder transportarla, se la impregna de colodión, el cual, una vez seco, sostiene sus mallas.

622. **Imperfección de los medios de alumbrado.** — **Luminiscencia.** — A pesar de los perfeccionamientos introducidos en los sistemas de alumbrado por incandescencia, la proporción de energía utilizada en forma de luz es muy pequeña, y gran cantidad de energía se pierde en forma de radiaciones oscuras y únicamente caloríficas.

En ciertos fenómenos, llamados *fenómenos de luminiscencia*, hay emisión de luz, sin que el cuerpo que la produce se halle a temperatura elevada. Su estudio es muy incompleto. Entre ellos, citaremos: la fosforescencia del fósforo, fenómeno en virtud del cual este cuerpo emite luz oxidándose a baja temperatura; la fosforescencia del azúcar y de otras numerosas sustancias, cuando se rompen o frotan, etc. También debemos incluir la emisión de luz por seres vivos, cuales son los gusanos de luz, las fotobacterias, los animales marinos que viven a grandes profundidades, etc. Conviene notar que, en estos seres, la energía se aprovecha infinitamente mejor que en nuestros aparatos de alumbrado; puesto que todas las radiaciones que aquellos emiten son luminosas.

Ahora empieza a aprovecharse, en el alumbrado, fenómenos de luminiscencia producidos por la descarga eléctrica en gases enrarecidos.

623. **Emisión de las radiaciones por los gases y vapores — Análisis espectral.** — Un gas o un vapor pueden, por varios procedimientos, volverse luminosos y capaces de emitir radiaciones (624). En este caso, obsérvase, con el espectroscopio, que tales radiaciones no forman una serie continua, como en el caso anterior. Los espectros están formados por líneas brillantes finas, o bandas difusas, separadas unas de otras

* Planta textil, originaria de China, cuyas fibras son reputadas como las mejores para la fabricación de estas camisetas.

por intervalos poco iluminados (lámina de color n^{os} 2, 3, 4, 5, 6). Además, cada cuerpo simple, aislado o combinado con otros cuerpos, da siempre las mismas rayas, cuando está contenido en un mismo gas o en vapor luminoso. Ahí se halla el origen de un método de análisis particular, el *análisis espectral*, que permite conocer la presencia de un cuerpo simple en una sustancia, por el examen del espectro de las radiaciones emitidas por ésta.

Además, en las partes infra-roja y ultra-violada del espectro, existen rayas que podemos llamar *brillantes*, por su analogía con el espectro luminoso. Se las encuentra, en el primer caso, con el bolómetro, en el segundo, mediante la fotografía. De este modo, para determinarlas, pueden aprovecharse los fenómenos de fosforescencia y fluorescencia (639, 640).

624. Nociones de análisis espectral* — Los cuerpos que, reducidos a vapores, dan espectros más claros son los metales.

Para producir estos espectros, se puede, como han efectuado Kirchhoff y Bunsen, impregnar de una sal del metal — con preferencia un cloruro que es, generalmente, más volátil, — un alambre de platino e introducir este alambre en la llama muy poco luminosa de un mechero de gas que arda con luz azul (mechero Bunsen). La llama se ilumina y adquiere un color que depende del metal; ilumínase con esta luz la hendidura de un espectroscopio (fig. 641) y se ve, en el antejo, un espectro formado por rayas brillantes diversamente coloreadas y algunas de las cuales son características del metal de la sal. Y permanecen las mismas sea cual fuere el ácido de la sal empleado; pero, según este ácido, se añaden otras rayas características de los cuerpos unidos al metal.

Los espectros más simples son los de los metales alcalinos. En el de sodio, particularmente, se encuentran rayas amarillas características, muy juntas y que no parecen separadas sino cuando se usa un espectroscopio muy dispersivo (que posea varios prismas). Los espectros de los demás metales contienen un número más o menos grande de rayas.

En los metales que sólo se volatilizan a temperaturas muy elevadas, se hacen mucho más difíciles los experimentos. En ese caso, debe recurrirse a un foco de calor más intenso que el mechero Bunsen.

El metal estudiado se volatiliza en un arco voltaico, o bien, se hace brotar una chispa eléctrica entre dos puntas del metal.

Para estudiar el espectro de los cuerpos gaseosos, se iluminan, generalmente, introduciéndolos en un tubo de Geissler (963) (fig. 957) que se ilumina por la acción de las descargas eléctricas en un carrete de inducción (875).

Este procedimiento de análisis ha sido muy fecundo, y merced a él se han descubierto cuerpos simples nuevos, por el examen de sustancias que presentaban en el espectroscopio rayos que no pertenecían a ningún

* Los párrafos relativos al análisis espectral han sido redactados en colaboración con A. de Gramont.

elemento conocido. De este modo, en 1861, Kirchhoff y Busen descubrieron el *cesio* y el *rubidio*; Crookes halló, en 1862, el *talio*; Reich y Richter encontraron el *indio*, en 1864, y Lecoq de Boisbaudran el *galio*, en 1876.

También se debe al análisis espectral el estudio de la constitución de los astros (636).

Finalmente, la observación en el espectro solar y en el de las estrellas, de una raya contigua a la raya D condujo a Lockyer a admitir la existencia de un elemento nuevo, el *helio*. Ramsay identificó el espectro del helio con el de un gas aislado por él en ciertos minerales (cleveita, brogerita), y que encontró, después, en el aire.

625. **Perfeccionamientos introducidos en la producción de los espectros.** — 1º *Espectros de llamas.* — El inconveniente del método de producción de los espectros de llamas, debido a Kirchhoff y Bunsen, es la volatilización rápida de la sal que impregna el alambre de platino. En las investigaciones fotográficas, para las cuales se requiere a veces varias horas de exposición, se han ideado varios medios para producir regularmente el espectro. Eder y Valenta, por medio de un movimiento de relojería, hacen girar una rueda formada por dos discos de níquel, que comprimen un ribete de tela metálica de platino. La rueda de 55 grados de inclinación sumerge este ribete, por su parte inferior, en la solución de la sal que se estudia y, por su parte superior, en la llama de un quemador Bunsen.

Cuando se introduce un sólido, como el platino, en la llama del quemador, se disminuye, indudablemente, la temperatura de ésta. Para evitar este inconveniente, Gouy imaginó alimentar el quemador con aire que atraviesa un vaso en el que se pulveriza una solución del cuerpo estudiado. Los espectros obtenidos de este modo son muy ricos en rayas y se extienden mucho por el ultra-violado.

Por este procedimiento, ha estudiado Watteville el espectro ultra-violado correspondiente a las diversas regiones de la llama: cono azul interno, llama propiamente dicha que rodea a éste y región intermedia. Ha reconocido que, desde el punto de vista espectral, estas regiones ofrecen caracteres diferentes. Para este estudio, modificó algo el método de Gouy: en la llama de gas de treinta mecheros, pulveriza las soluciones salinas estudiadas, arrastradas por una corriente de aire. La observación se verifica en el sentido de la longitud de las luces. Las intensidades de las pequeñas llamas se añaden gracias a la transparencia que tienen unas para otras. De este modo, ha obtenido espectros mucho más abundantes en rayas que los observados anteriormente, y que se extendían mucho por el ultra-violado.

Por fin, Hemsalech y Watteville han establecido un método general que se adapta a las diversas llamas empleadas en espectroscopia. Hacen pasar uno de los gases que van al mechero por un vaso en el que se hacen brotar chispas entre dos electrodos del metal que se estudia, o bien se establece un arco eléctrico entre dos carbones, uno de los cuales, de mecha, contiene la sal del metal. Empleando este método, han podido hacer un estudio sistemático de los espectros de llama de hierro y de calcio, producidos por las llamas siguientes: aire-gas de alumbrado (llama de Bunsen), oxígeno-gas de alumbrado, oxígeno-hidrógeno, aire-hidrógeno, oxígeno-acetileno.

2º *Espectro del soplete oxhídrico.* — Hartley ha estudiado los espectros de los cuerpos sólidos volatilizados en la llama muy caliente del soplete oxhídrico, y ha obtenido así cierto número de rayas más considerable que el que se había observado antes en la llama del mechero Bunsen.

3º *Espectros del arco.* — Para obtenerlos, puede situarse el carbón positivo del arco abajo y colocar en el cráter que en él se forma la sustancia estudiada. Más ventajosamente, empléase un carbón positivo formado por un tubo de carbón cuya cavidad está llena de la sustancia. Si se trata del espectro de un metal poco fusible, sustitúyense los carbones del arco por varillas del mismo metal.

4º *Espectros de chispas.* — En el caso de los sólidos, la producción del espectro no ofrece dificultad alguna. En los líquidos (por ejemplo, en soluciones salinas) Lecoq de Boisbaudran hacía explotar la chispa del carrete entre un alambre de platino y la superficie de un líquido. En un tubo cerrado, no puede operarse, a causa de la pulverización de las gotas en las paredes del tubo. M. Demarçay empleaba una pequeña

mecha de hilos de platino sumergida en la solución y hacia brotar la chispa entre esta mecha y un alambre grueso de platino.

Todos estos aparatos producen con mayor o menor intensidad rayas de platino. Gramont propuso, en 1907, un mecanismo en el cual la chispa explota entre dos gotas del líquido por estudiar, llevadas una sobre otra a los extremos de dos tubos capilares de sílice fundida.

5° *Espectros de chispas oscilantes.* — Schuster y Hemsalech, en el curso de sus investigaciones sobre la chispa eléctrica, intercalaron un carrete de alambre en el circuito de descarga de un condensador, de manera a producir una descarga oscilante. Y reconocieron que si la inducción del carrete era suficientemente fuerte, el espectro de las líneas del aire desaparecía por completo. Más tarde, Hemsalech ha vuelto a estudiar los efectos de las inducciones variadas, y ha observado que para obtener chispas muy oscilantes y formadas únicamente por fragmentos vaporizados de los electrodos, deben intercalarse carretes de self, sin ningún núcleo metálico. De este modo, reconoció Hemsalech los fenómenos siguientes: La chispa ordinaria se compone de tres partes: la descarga inicial o trazo de fuego que da principalmente las rayas del aire; después, algunas oscilaciones muy rápidas que producen las rayas metálicas llamadas de alta temperatura, y, en fin, la *aureola* de la chispa que produce las rayas metálicas llamadas de baja temperatura.

Por el contrario, la chispa oscilante se compone casi exclusivamente de la aureola y no contiene sino rayas de los metales. Las rayas de elevada temperatura se debilitan hasta desaparecer y las de baja temperatura se vuelven más intensas.

6° *Espectros de disociación. Rayas últimas.* — Los recientes trabajos de Mr. A. de Gramont sobre los « espectros de disgregación » y sobre el « análisis espectral directo de los minerales » han demostrado que la chispa eléctrica de una batería de botellas de Leyden cargada continuamente por un carrete de Ruhmkorff, produce al estallar directamente sobre un compuesto sólido o derretido un espectro de líneas muy vivas, en donde, por razón de la disociación, cada cuerpo está representado, como si estuviera solo, por las rayas características de su espectro individual (Lám. col. n° 6: Galena PbS). Del mismo modo se tiene también no sólo los espectros de los metales, sino los de los metaloides, de los cuales la mayor parte no podían ser reproducidos hasta ahora más que en los tubos de gas de Geissler. Suprimiendo la condensación por la batería se hace desaparecer los espectros de los metaloides y la chispa del carrete solo no da más que las rayas capitales, debilitadas, de los metales. Las sales fundidas o las soluciones dan entonces espectros mixtos que contienen algunas rayas de los cuerpos simples y bandas debidas a los compuestos no disgregados; éstas varían según la naturaleza de la combinación de que se trata.

En el curso de sus estudios, A. de Gramont ha observado que la débil dosis de un cuerpo en un compuesto dado, puede manifestarse de dos maneras diferentes: 1° por un espectro persistente, pero reducido a algunas rayas capitales; 2° por un espectro pasajero e irregular, en el caso de ser heterogénea la substancia.

Asimismo, llama *rayas últimas* a las que desaparecen las últimas cuando la dosis del elemento que revelan tiende hacia cero, y, por consiguiente, las que se deben buscar primero para caracterizar los *indicios* de un cuerpo. Estas rayas últimas no son siempre las más brillantes del espectro de disociación de un elemento, pero entran en ciertas categorías definidas por las propiedades siguientes: 1° resisten a la intercalación de una fuerte self-inducción; 2° están presentes en el espectro del arco; 3° están presentes en los espectros de las llamas muy calientes (soplete oxhídrico o cono azul del mechero de Bunsen).

Las rayas últimas de la chispa condensada son, pues, las que persistirían a una temperatura relativamente baja; y la débil dosis de un cuerpo en un compuesto modifica el espectro de este cuerpo como lo haría un descenso de temperatura del foco luminoso.

Ciertos metaloides no dan espectros de arco (Cl, Br, I, O, S, Se, Az). Así como se podía prever, estos cuerpos no presentan rayas últimas, y la sensibilidad espectral de sus líneas es bastante débil.

626. *Espectros de diversos órdenes.* — Los gases vueltos luminosos en los tubos de Plucker producen espectros de dos clases diferentes:

1° *Espectros de primer orden*, o de *bandas acanaladas*, observados en el ázoe o nitrógeno y en el carbono (Lám. col. n° 5).

2° *Espectros de segundo orden*, o de *rayas brillantes*, observados en el hidrógeno (Lám. col. n° 2).

El primero puede convertirse en espectro de segundo orden, según la naturaleza de

la descarga : por ejemplo, en el nitrógeno, o con el carbono cuando se hace pasar la descarga de un condensador se obtiene un espectro de segunda clase.

Los *espectros de líneas* son debidos a los elementos mismos y probablemente al átomo del cuerpo simple puesto en libertad. Los *espectros de bandas* son debidos a los cuerpos volatilizados sin descomposición; éstos difieren con las diversas sales de un mismo metal.

627. **Leyes de la distribución de las rayas en los espectros.** — Las rayas no se reparten de un modo cualquiera en los espectros. En efecto, su distribución obedece a ciertas leyes de periodicidad. Y, en particular, las rayas de ciertos cuerpos simples pueden dividirse en varias series y todas las de una misma serie ofrecen caracteres comunes y modificaciones simultáneas, tales como la inversión (632), el cambio de lugar por la influencia de la presión o del campo magnético, etc. Cada serie *converge* a medida que decrece la longitud de onda, es decir que, en este caso, las rayas que la constituyen se acercan cada vez más.

Desde el punto de vista de la periodicidad de las rayas, los espectros de líneas son de dos tipos :

I. Los espectros del primer tipo constituyen *dobletes* (dos rayas aproximadas) o *tripletes* (tres rayas aproximadas) cuya separación, así como también la intensidad, disminuye rápidamente cuando su número de orden aumenta. Hay tres clases de series :

1º *El grupo principal*, compuesto de dos o tres especies de series que convergen hacia un límite común y en que la raya más refrangible de cada doblete o triplete es la más fuerte;

2º *El grupo reducido o primera serie secundaria*, que consiste en dos o tres series cuyos términos correspondientes forman dobletes o tripletes que presentan diferencias constantes entre las frecuencias de vibración de las rayas;

3º *El grupo nebuloso o segunda serie secundaria*, formado, como el anterior, por series dobles o triples; pero en que los primeros términos de los tripletes y el primer término de los dobletes son, a su vez, rayas compuestas.

Las series reducidas y las nebulosas del mismo orden convergen hacia el mismo límite.

Entre los elementos que pertenecen al tipo I, se encuentran el hidrógeno, los metales alcalinos, el oxígeno, la plata, etc.

II. En los espectros del tipo II, no pueden reconocerse dobletes ni series propiamente dichas; pero las rayas pueden ordenarse en grupos tales que los términos sucesivos correspondan a diferencias constantes de frecuencia. Tales son los espectros del estaño, del plomo, etc.

Circunstancias de producción de las series de rayas. — Las diferentes series que constituyen el espectro de un elemento no se producen en las mismas condiciones. Por ejemplo, las diferentes regiones de una llama dan series diferentes según las temperaturas de estas regiones. Así, en los metales alcalinos, hay rayas que son igualmente intensas en todas las partes de la llama y pertenecen a la serie principal del elemento considerado; otras son especiales a la parte baja de la llama y se colocan entre las series secundarias. Esto induce a suponer que el átomo del elemento se halla en estados diferentes en las diversas regiones de la llama.

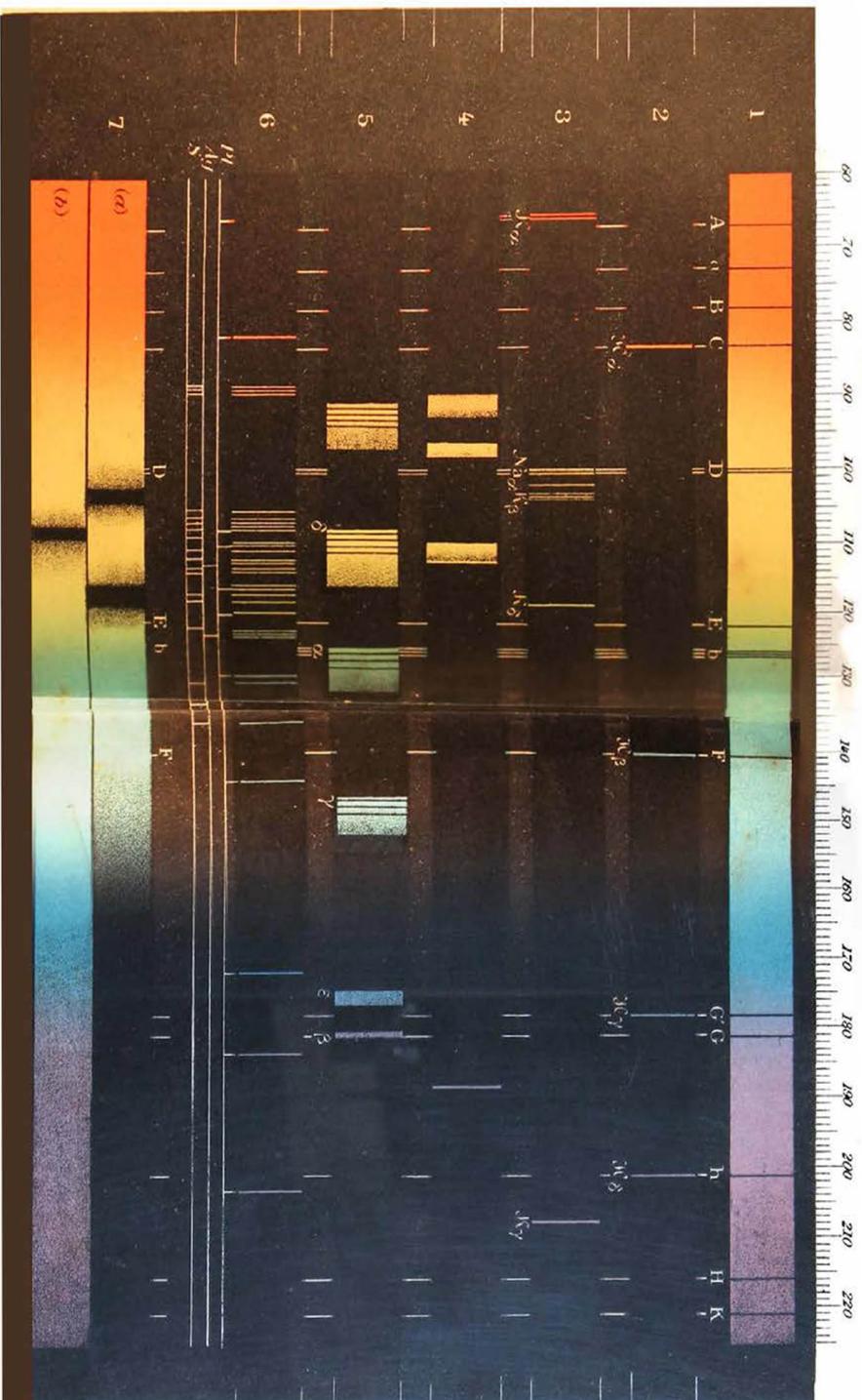
Lenard ha reconocido que el arco que contiene vapores metálicos está formado por llamas encajadas unas en otras y cada una de las cuales sólo emite una de las series espectrales del metal.

Si se comparan los espectros de las llamas a los del arco o de la chispa, nótase, en la llama, las rayas más fuertes del arco y hay que acercar el espectro a una chispa oscilante, al espectro del cono azul, que es la parte más cálida de la llama.

Espectros de bandas. — Desde el primer momento aparece la regularidad de su disposición; pero la ley que los rige ha sido descubierta por Deslandres y confirmada por Kayser y Runge. Las bandas están, en realidad, constituidas por gran número de líneas, y las bandas por ellas constituidas forman series que se hallan ligadas entre sí de tal manera que, en cada una, la separación entre dos líneas consecutivas es un término de una serie aritmética.

ACCIONES DE LOS CUERPOS SOBRE LAS RADIACIONES ESPECTROS DE ABSORCIÓN

628. **Acciones de los cuerpos sobre las radiaciones.** — **Reflexión, difusión, absorción.** — Cuando una radiación incide sobre un cuerpo,



- 1 — Espectro solar con las principales rayas de Fraunhofer.
- 2 — Hidrógeno en tubo de Plucker — Chispa.
- 3 — Potasio K y Sodio Na en la llama del gas.
- 4 — Fajas de las Sales de Cal en la llama del gas.
- 5 — Llama del gas de alumbrado, como azul.
- 6 — Espectro de disociación de la Galena (PbS) argentina, chispa condensada.
- 7 — Espectros de absorción (a) Sangre arterial, con 2 fajas de oxihemoglobina entre D, y F.
(b) Sangre reducida con la faja de Stokes en el espacio comprendido entre las precedentes.

parte de ella es, en general, devuelta por reflexión regular o por difusión, según el mayor o menor pulimento de la superficie; otra parte traspasa el cuerpo, si éste es transparente para tal radiación; y otra, en fin, es absorbida por el cuerpo, al cual calienta. Como medida de la *intensidad* de las radiaciones, tomaremos su *potencia*, es decir la energía que transportan por segundo.

Poder reflector. — Supongamos que una cara plana de un cuerpo recibe un haz de rayos paralelos de una radiación determinada. Llamaremos *poder reflector* del cuerpo para la radiación y la incidencia consideradas, a la *relación entre la intensidad, de la radiación reflejada y la intensidad de la radiación incidente.*

Se comprende el modo de determinar el poder reflector: mediante un aparato termométrico, mídese la potencia del haz incidente y la del reflejado. Entre los experimentadores que han hallado esta medida citaremos a Melloni y Desains.

El poder reflector de un cuerpo brillante varía con la incidencia con que se dirigen las radiaciones y aumenta con ella. Es mínimo en la incidencia normal e igual a 1 en la incidencia rasante.

Los cuerpos que presentan mayor poder reflector son los metales brillantes, especialmente la plata.

El poder reflector depende también de la radiación incidente. Los diferentes cuerpos devuelven, generalmente, ciertas radiaciones con mayor intensidad que otros.

Poder difusivo. — Es la *relación entre la intensidad de la radiación difundida y la incidente.*

Es completamente análogo al poder reflector y, en un mismo cuerpo, varía con la naturaleza de la radiación.

Además, la difusión puede considerarse como debida a la reflexión en las asperezas del cuerpo, cuando éste no está pulimentado.

Absorción de las radiaciones. — La parte de radiación incidente no reflejada ni difundida penetra en el cuerpo. A medida que camina por él, disminuye gradualmente su intensidad, según la siguiente ley:

La intensidad de la radiación decrece en progresión geométrica cuando el espesor crece en progresión aritmética.

Sea I la intensidad de la radiación al entrar en el cuerpo; al cabo de 1 mm. se vuelve n veces menor. Durante el segundo milímetro, se hace otras n veces más pequeña, y así sucesivamente. Por lo tanto, a x milímetros de la superficie de entrada, la intensidad de la radiación será $i = \frac{I}{n^x}$.

Si el espesor atravesado es suficientemente grande, la intensidad de la radiación llegará de este modo a un valor *prácticamente* nulo.

El mismo fenómeno se reproduce en todos los cuerpos. En un metal, la radiación es completamente absorbida por un espesor sumamente pequeño; en el agua, lo es para un espesor en extremo grande. Pero si se toma una lámina metálica bastante delgada, como un pan de oro, es transparente. Por el contrario, el agua de mar que, en pequeñas canti-

dades es transparente, resulta opaca en cantidades grandes. Así, en el fondo de los mares profundos, reina completa oscuridad. Los gases son, generalmente, poco absorbentes.

Influencia de la naturaleza de las radiaciones. — La rapidez con que un cuerpo determinado absorbe una radiación depende, en gran parte, de la naturaleza de ésta. Sólo la sal gema es, poco más o menos, igualmente transparente para las radiaciones oscuras y las luminosas; pero el agua y el vidrio, transparentes para las radiaciones luminosas, son opacos para la mayoría de radiaciones caloríficas oscuras, para las infra-rojas* y también para las ultra-violadas. Lo mismo sucede con los medios del ojo. Por tanto, no debe extrañar el que dichas radiaciones sean invisibles.

629. **Poder absorbente.** — Supongamos que un haz XA (fig. 645) de una radiación simple incide en un cuerpo A. Parte de él es reflejada; otra se difunde; una tercera se transmite y, en fin, otra parte es absorbida por el cuerpo.

Llábase *poder absorbente* del cuerpo, para la radiación contenida en el haz XA, *la relación entre la cantidad de energía absorbida y la cantidad de energía incidente.*

Este coeficiente no depende sólo de las propiedades absorbentes del cuerpo para la radiación considerada, sino que también depende de su poder reflector y de su poder difusivo, y, por consiguiente, de la inclinación del haz incidente.

Designemos por i la intensidad del haz incidente; por r , la de la radiación reflejada; por d la de la radiación difundida, y por t la de la radiación transmitida. La cantidad de energía absorbida por segundo es $i - (r + d + t)$ y el poder absorbente es

$$a = \frac{i - (r + d + t)}{i}.$$

Casos particulares. — 1º *Plata pulimentada* : r se acerca mucho a i , a es casi nula.

2º *Negro de humo* : Una capa bastante densa de negro de humo no refleja, ni difunde ni transmite sino una fracción muy pequeña de la energía que recibe : luego a es casi igual a 1.

3º *Cuerpo completamente negro* : En un cuerpo perfectamente negro, $r = 0 = d = t$. Luego el poder absorbente es igual a 1.

630. **Espectros de absorción.** — Si se hacen pasar las radiaciones emitidas por un cuerpo sólido incandescente, a través de un cuerpo sólido, líquido o gaseoso más o menos transparente, y se estudia en el espec-

* Generalmente se había atribuido la acumulación de calor en los invernaderos a los fenómenos siguientes. El vidrio deja pasar las radiaciones luminosas del sol, que calientan los cuerpos que están dentro; mientras que el calor que éstos emiten a su vez, como es obscuro, no atraviesa el vidrio y queda adentro. Wood ha observado que el vidrio detiene, al entrar, la porción más importante del calor solar, que tiene la forma de rayos infra-rojos. Ha demostrado experimentalmente que, bajo una placa de sal gema la temperatura sube más que bajo una lámina de vidrio, porque la sal gema deja pasar los infra-rojos incidentes. Si el calor de los invernaderos se disipa poco, consiste principalmente en que el aire está allí encerrado y que la convección es imposible.

troscopio la luz transmitada, se ven, en el espectro, lagunas negras, llamadas *bandas de absorción*, que ocupan el lugar de las radiaciones absorbidas por el cuerpo. Ciertos espectros de absorción son particularmente simples. De este modo, el cristal rojo, colorado por óxido cuproso, no deja pasar sino las radiaciones rojas. Con frecuencia, las bandas de absorción están diseminadas por todas las partes visibles o invisibles del espectro (lámina de color, nº 7).

Muchas son las investigaciones efectuadas sobre los espectros de absorción, las cuales han dado a conocer las relaciones que existen entre estos espectros y la constitución de las sustancias que los producen. Así se ha reconocido que los compuestos orgánicos de la serie grasa producen una absorción general más o menos extensa; pero sin bandas, y, en cambio, los compuestos aromáticos y los alcaloides producen una o dos bandas de absorción características. Además, el estudio del espectro de absorción es de la mayor utilidad en la fabricación y el uso de las materias colorantes.

631. Relación entre la emisión y la absorción. -- La experimentación ha probado que los cuerpos de mayor poder absorbente, es decir, los cuerpos negros, son los que tienen también mayor poder emisivo. Por esta razón, una superficie cualquiera cubierta de una capa de negro de humo, por pequeña que ésta sea, tiene mayor poder emisivo que la superficie de cualquier otro cuerpo. Al contrario, los metales brillantes que, a causa de su gran poder reflector, envían la mayor parte de radiaciones sin absorberlas, tienen poco poder emisivo. Para convenirse de ello, basta colocar la mano ante un vaso ahumado con negro de humo y ante otro de metal brillante que contengan ambos agua hirviendo: la sensación de calor será mucho más intensa ante el vaso ahumado.

De aquí resulta que cuando se pone a calentar agua en un vaso, es preferible que esté ahumado, porque absorbe mejor el calor; mientras que, para conservarla caliente fuera del fuego, es mejor poner el agua en un vaso de metal pulimentado. Asimismo, si se echa hollín en la superficie de la nieve, ésta se derretirá más pronto al sol, porque absorberá más calor.

632. Inversión de las rayas de los espectros metálicos. — Ley de Kirchhoff. — La relación entre los poderes absorbente y emisivo continúa más lejos. Si se hace pasar, antes de que incidan en la hendidura del espectroscopio, las radiaciones de un cuerpo sólido incandescente, a través de una llama del mechero Bunsen, convertida en luminosa por el vapor de una sal metálica, se ve aparecer en el espectro rayas negras, en el lugar en que deberían formarse las rayas brillantes de la llama si ésta fuera la única que iluminase el espectroscopio.

El experimento es fácil de hacer con una llama que contenga cloruro de sodio, o mejor sodio. Este fenómeno, descubierto por Kirchhoff, se llama *inversión de las rayas*.

Demuestra que un vapor luminoso *absorbe principalmente las radiaciones que es capaz de emitir*.

Ley de Kirchoff. — La ley de Kirchoff determina la relación que existe entre la absorción de una radiación por un cuerpo y la omisión por este cuerpo de la misma radiación.

La relación entre los poderes emisivo y absorbente de una sustancia para la misma radiación y en iguales circunstancias es la misma en todos los cuerpos.

Esta relación constante es igual al poder emisivo E del cuerpo negro en las mismas condiciones. En efecto, sea e el poder emisivo de un cuerpo y a su poder absorbente para una radiación dada: siendo 1 el poder absorbente del cuerpo negro, tendremos, aplicando esta ley al cuerpo considerado y al cuerpo negro:

$$\frac{e}{a} = \frac{E}{1}, \quad \text{o} \quad \frac{e}{a} = E.$$

Esta ley se aplica a los poderes absorbente y emisivo tales como los hemos definido. Pero tiene una excepción importante. Muchos cuerpos que absorben radiaciones no las emiten en las mismas condiciones. Tales son los cuerpos coloreados por transparencia. Un cristal rojo, por ejemplo, absorbe las radiaciones azules a la temperatura ordinaria, y, sin embargo, es incapaz de emitirlos a esta temperatura. La ley de Kirchoff sólo es cierta cuando el poder emisivo del cuerpo para la radiación considerada no es nulo. En efecto, según lo que precede se ve que el poder emisivo puede ser nulo sin que lo sea el poder absorbente.

633. Rayas del espectro solar. — Si se produce un espectro solar puro, se ve que no es continuo; sino atravesado por rayas oscuras que se denominan *rayas del espectro solar*.

Wollaston fué el primero que las indicó, en 1802; pero, en 1815. Fraunhofer las estudió detenidamente, dando una descripción detallada de ellas. Designó las más aparentes con las letras A, *a*, B, C, D, E, *b*, F, G, H; generalmente se llaman *rayas de Fraunhofer*. La raya A está en el límite del rojo; B y C se encuentran en el rojo; D, en el límite del anaranjado y del amarillo; E, en el verde; F, en el azul; G en el añil y H en el violado. También hay otras notables, tales como *a* en el rojo y *b* en el verde. Asimismo, existen rayas en la parte infra-roja y en la ultra-violada del espectro.

Después de los descubrimientos de Fraunhofer se han efectuado numerosas investigaciones sobre este punto y se han publicado dibujos más completos de las rayas del espectro solar. Se puede citar:

El dibujo de Angström, de 2,09 m. de longitud, que contiene 1 000 rayas.

Y el de Rowland, de 13 m., que comprende 20 000 rayas, medidas con exactitud.

En la lámina de color (espectro nº 1), se indican algunas rayas del espectro solar, las más importantes. Para dar idea del inmenso número

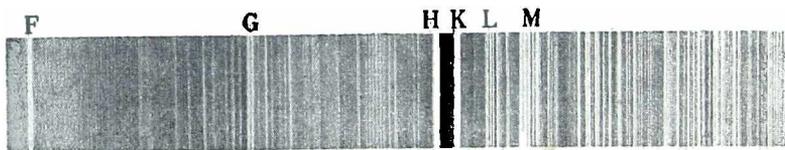


Fig. 648.

de rayas, en la figura 648 se representa la reproducción de una fotografía de una región del espectro solar*.

* Esta fotografía ha sido obtenida por Gramont.

634. **Origen de las rayas del espectro solar.** — **Rayas telúricas.** — **Constitución del sol.** — Algunas rayas de éstas deben atribuirse a la absorción por la atmósfera terrestre y, principalmente, por el vapor de agua que ella contiene: denominanse *rayas telúricas*. En efecto, por una parte, son más aparentes cuando el sol se halla cerca del horizonte, es decir, cuando sus rayos atraviesan gran espesor de aire; por otra, Jansen ha demostrado que haciendo atravesar a la luz emitida por un cuerpo incandescente, un tubo de 37 metros de longitud que contenga vapor de agua bajo presión, se obtiene un espectro de absorción compuesto de líneas negras que ocupan los mismos sitios que las rayas telúricas del espectro solar.

La mayoría de las demás rayas negras ocupa, en el espectro solar, los mismos lugares que las rayas brillantes de los diversos cuerpos simples, en los espectros de emisión de estos cuerpos. Esta coincidencia puede verse iluminando la mitad de la hendidura de un espectroscopio, con luz solar, y la otra mitad con la luz de un vapor o gas luminoso. De este modo, se hallará que la raya negra D del espectro solar coincide con la raya amarilla de sodio.

De ahí se deduce que en el sol existen estas sustancias. Para explicar la inversión de las rayas, se supone que el sol está formado por un núcleo incandescente (*fotosfera*) que emite radiaciones que forman un espectro continuo. Este núcleo está rodeado de una atmósfera a temperatura elevadísima, llamada *cromosfera*, de color rosa, que contiene los vapores de diversos cuerpos. La absorción por la parte inferior de esta atmósfera produce las rayas negras del espectro.

En el borde de la cromosfera aparecen inmensas llamas rosas de hidrógeno, las *protuberancias*, que suben hasta 10' del borde del astro.

En cuanto a la fotosfera, se la supone gaseosa, pero a una presión sumamente grande, a consecuencia del peso de las capas superiores; por esta razón emite radiaciones que forman un espectro continuo.

Corona solar. — Más allá de la cromosfera, extiéndese la corona, pero que sólo es visible durante los eclipses de sol, porque, en tiempo normal, su luz es demasiado débil para que pueda distinguirse en la resplandeciente luz emitida por el sol. Compónese, en primer lugar, de una atmósfera, que emite un espectro de líneas brillantes que comprende principalmente rayas de hidrógeno. Entre estas líneas, hay también una raya *verde* que no puede atribuirse a ninguno de los cuerpos conocidos de la superficie del globo. Supónese que es debida a un elemento desconocido, al que se ha dado el nombre de *coronio*.

La corona comprende, además, especies de rayos, o *banderolas*, que se extienden a enorme distancia del sol (hasta a 12 diámetros solares). Tales *banderolas* producen un espectro continuo. Por esta razón, se admite que están constituidas por partículas sólidas o líquidas incandescentes.

Presión de radiación. — Para explicar que estas partículas no son atraídas por la enorme gravedad que reina en las proximidades del sol, se hace intervenir una acción particular de las radiaciones, la *presión de radiación*. Maxwell, y luego Bartoli y Boltzmann, han enseñado teóricamente que, cuando una radiación ataca a un cuerpo, ejerce sobre él una especie de presión. Esta presión fué puesta en evidencia por experimentos de Lebedew y, más recientemente, por los de Nichols y Hulls.

A la distancia de la tierra, la presión de la radiación solar es sólo de 0,6 miligramo por metro cuadrado; pero cerca del sol es incomparablemente mayor. Para los cuerpos pequeños, en los cuales la superficie tiene grande importancia, por relación a la masa, dicha presión puede compensar y hasta exceder a la acción newtoniana ejercida por el sol. A ella se atribuye también la orientación de las cabelleras de los cometas, que se colocan siempre opuestamente al sol.

635. **Temperatura del sol.** — El problema de la temperatura del sol ha dado lugar a numerosas evaluaciones contradictorias. Se ha vuelto a estudiar el problema, utilizando las leyes de la irradiación.

La radiación que posee el máximo de energía en el espectro solar es una radiación amarilla de una longitud de onda $\lambda_m = 0,58 \mu$. Si se supone que el sol irradia como un cuerpo negro, su temperatura absoluta calcúlase por la fórmula $\lambda_m T = 2940$ (620). De este modo, resulta $T \approx 5070$ o sea, poco más o menos, 4 800 grados vulgares.

Por otra parte, en 1906, Millochau buscó la temperatura del sol, aplicando la ley de Stefan, por medio del pirómetro de Fery (242), y así, halló 5 633 grados absolutos, o sean 5 400 grados vulgares.

636. **Espectros de la luna, de los planetas y las estrellas.** — La luna da el mismo espectro que el sol: lo cual prueba que no emite sino luz solar difundida. Lo mismo sucede con los planetas con aproximación de algunas rayas, producidas por su atmósfera.

Espetros de las estrellas. — En la mayoría de las estrellas, el espectro es análogo al del sol, presentando rayas negras que corresponden a los diversos cuerpos simples conocidos en la superficie de la tierra. Las *nebulosas no resolubles* presentan, por el contrario, un espectro de rayas brillantes. Están, pues, formadas únicamente por vapores incandescentes.

637. **Aplicaciones del análisis espectral al estudio del movimiento de los astros.** — **Principio de Doppler.** — Experimentos de M. H. Deslandres. — Si la teoría de las ondulaciones es exacta, cuando un foco de luz se mueve respecto de un espectroscopio, el número de vibraciones que envía por segundo una de sus radiaciones a la hendidura del espectroscopio no será el mismo que si el foco permaneciera inmóvil (423). La longitud de onda aparente λ' de la radiación depende de la longitud de onda real λ que se observaría si el foco estuviera inmóvil, por la relación

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{V - v}{V}, \quad \text{o} \quad \lambda = 1 - \frac{v}{V},$$

siendo v la velocidad del movimiento del foco respecto del observador, contada según el rayo, y V la velocidad de la luz.

Si v es bastante grande lo notaremos por una variación de la refrangibilidad de la radiación, es decir por el movimiento de la raya correspondiente : esto es lo que se conoce con el nombre de *principio de Doppler*. Si se acerca el foco, aumentando el número de vibraciones recibidas por segundo la desviación se efectúa hacia el violado; pero si el foco se aleja, la desviación se efectúa hacia el rojo.

Se podrá calcular estas desviaciones por la posición de las rayas de un foco terrestre que no se desvían. Por ejemplo, a consecuencia del movimiento de rotación del sol, uno de sus bordes se aproxima a nosotros mientras que el otro se aleja. Si se apunta un espectroscopio sucesivamente a esos dos bordes, se verá que las rayas solares cambian de sitio respecto de las telúricas. De la misma manera, siguiendo este procedimiento, se puede descubrir en una estrella un movimiento que se efectúa según el radio que la une a la tierra y medir el valor de la velocidad por la magnitud del movimiento de las rayas. De este modo encontró M. H. Deslandres que ζ de Hércules tiene un movimiento de velocidad igual a 60 kilómetros por segundo respecto del sol; y por medio de medidas semejantes determinó la velocidad de rotación del anillo de Saturno.

· FOSFORESCENCIA Y FLUORESCENCIA

638. **Transformación de las radiaciones por la materia.** — **Fosforescencia y fluorescencia.** — Cuando en un cuerpo inciden radiaciones, éstas son absorbidas en todo o en parte. La experimentación demuestra que el cuerpo restituye la energía de las radiaciones que ha absorbido bajo diversas formas. Generalmente, caliéntase e irradia en torno suyo calor oscuro que constituye las radiaciones infra-rojas. A menudo, la energía es devuelta también en forma de radiaciones luminosas, que es lo que ocurre en la *fosforescencia* y en la *fluorescencia* que son casos de *luminiscencia*.

639. **Fosforescencia.** — Ciertos cuerpos, después de estar expuestos a una luz intensa, resplandecen en la oscuridad, y se dice que son *fosforescentes* *.

1º *Cuerpos fosforescentes.* — *Fosforoscopio.* — Los cuerpos cuya fosforescencia se conoce por la observación inmediata, son principalmente el diamante y los sulfuros de calcio, estroncio, bario, zinc, así como las tierras raras (óxidos de praseodimo, samario, europio). Los estudios más recientes han demostrado que los cuerpos fosforescentes no son puros.

* No hay que confundir este fenómeno con la luminiscencia del fósforo cuando se oxida en el aire.

Cada uno de ellos es una solución sólida de una substancia inerte transparente y de un *fosforógeno* absorbente. Así, la cal se vuelve fosforescente cuando se la calcina con una centésima de óxido de manganeso. Las tierras raras, para que sean muy fosforescentes, deben ser diluidas en la cal, el sulfato y el fluoruro de calcio, la alúmina, etc. Siendo absorbente el fosforógeno, se comprende que si estuviera solo, la luz de fosforescencia que emiten las capas profundas, sería absorbida por las capas superiores, mientras que el diluyente transparente permite el paso de esta luz. Lo que confirma esta opinión, es que cuando se aumenta la proporción del diluyente, aumenta la fosforescencia, pasa por un máximo y luego decrece; luego el diluyente no es fosforescente por sí mismo.

De los cuerpos precedentes, algunos poseen una fosforescencia de larga duración. Becquerel ha demostrado que los sulfuros de estroncio y de calcio, después de estar bien aislados, permanecen visibles en la obscuridad durante unas treinta horas; el diamante permanece luminoso muchas horas, la aragonita de 15 a 20 segundos.

Fosforoscopio de Becquerel.

— Para estudiar los cuerpos cuya fosforescencia dura breve tiempo, Becquerel imaginó y empleó el fosforoscopio. Se coloca la substancia fosforescente C (fig. 649) en una caja, entre dos discos DD', comunicándoles

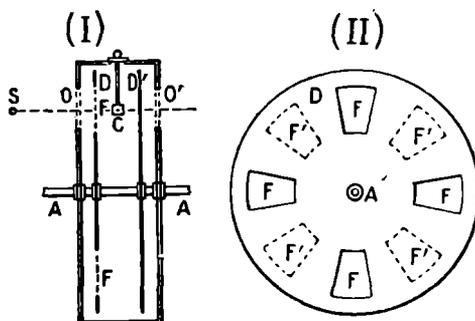


Fig. 649.

un movimiento rápido de rotación alrededor del eje AA. Estos discos tienen 4 aberturas cada uno; la figura 649, II, representa en trazos llenos las aberturas F del disco D, y en puntos las de F' del disco D' que se suponen vistas a través de D. Las aberturas de D alternan con las de D'.

Por la abertura O llega la luz del foco S que se emplea para excitar la fosforescencia, otra abertura O' permite observar, ya sea a simple vista, ya sea con un instrumento adecuado, la luz procedente de la fosforescencia. Se ve que el cuerpo no recibe luz sino cuando pasa delante de él una abertura F, y, en ese momento preciso, le oculta al observador el disco pleno D'. Un instante después, por el contrario, el disco plano D oculta la luz excitadora y la fosforescencia se hace visible a través de la abertura F' de D'.

Si la fosforescencia dura poco y si el eje gira lentamente, no se ve el cuerpo luminoso, porque ha dejado de brillar durante la sustitución de una abertura F' por otra F. Pero si la rotación es bastante rápida, se puede ver la fosforescencia y medir el tiempo que dura. Así es como ha demostrado Becquerel que la fosforescencia del fluoruro de calcio dura un tercio de segundo, la del nitrato de uranio dura una centésima de segundo sólo. Muchos sólidos se muestran luminosos en el fosforoscopio, y sobre todo ciertas substancias orgánicas : papel, azúcar, ámbar, cloro-

fila, etc. Ningún líquido es fosforescente; sólo los gases lo son en los tubos de Geissler.

2º *Radiaciones que producen la fosforescencia.* — *Ley de Stokes.* — Si se ilumina sucesivamente un cuerpo capaz de volverse fosforescente con diversas radiaciones simples, se ve que sólo las radiaciones más refrangibles (de longitud de onda inferior a 0μ , 5) excitan la fosforescencia: los rayos ultra-violetados son muy activos.

Metiendo la substancia en un tubo de Geissler (Crookes) se produce una fosforescencia muy viva y durable. Los rayos X y los de radio excitan también la fosforescencia.

La naturaleza de la luz que emite la fosforescencia se estudia en el espectroscopio, observando esta luz con el fosforoscopio. Los espectros que se obtienen se componen de bandas más o menos anchas.

Ley de Stokes. — Cuando se produce la fosforescencia por una radiación simple dada, se observa que *las luces emitidas por la fosforescencia tienen, generalmente, longitudes de onda mayores que la radiación excitadora*: tal es la ley de Stokes. En realidad, algunas veces se observan radiaciones de longitud de onda más pequeña que la de la radiación excitadora; pero son poco intensas.

3º *Acción del calor y de los rayos infra-rojos sobre la fosforescencia.* — Si se toma sulfuro de calcio expuesto al sol mucho tiempo y se le guarda en un tubo ennegrecido, donde no emita ninguna luz en la obscuridad, y se le calienta a una temperatura determinada, se observa que se vuelve luminoso durante algunos minutos. Y si se le calienta a una temperatura más elevada, vuelve a ser otra vez luminoso, y así sucesivamente. De modo que a cada temperatura emite cierta cantidad de energía, guardando siempre un residuo que es capaz de devolver a una temperatura más elevada.

La misma acción ejercen los rayos infra-rojos. Si en un cuerpo fosforescente se incide una radiación infra-roja, la luminiscencia de este cuerpo se hace más intonsa, pero de menor duración. Este efecto puede aplicarse a la investigación de las rayas en los espectros infra-rojos. Colócase, en el espectro, una pantalla recubierta de sulfuro de calcio, vuelto fosforescente. La fosforescencia persiste más en los puntos en que se debilitan las radiaciones infra-rojas. Las rayas infra-rojas, que podemos llamar negras, por su analogía con el espectro luminoso, aparecerán, pues, brillantes, mientras que las rayas brillantes aparecerán oscuras.

640. **Fluorescencia.** — Ciertas substancias no presentan la fosforescencia sino un tiempo muy breve, y se les ha llamado *fluorescentes*.

1º *Substancias fluorescentes.* — Este fenómeno se ha observado primeramente en ciertos cristales de fluorina (de donde proviene su nombre) que, al ser alumbrados por los rayos del sol, parecen rodeados de una aureola de luz lechosa violada o gris verdusco. Este mismo fenómeno se observa en diferentes grados en muchas substancias transparentes sólidas o líquidas. Citaremos: la *fluoresceína* (*taleína* de la *resorcina*) y sus derivados, como la *eosina* (*fluoresceína tribromada*), las *sales de uranio* y los vidrios que coloran (*vidrio de uranio*), los *platinocianuros*, el *sulfato de quinina*, el *ácido tártrico*, la *acedera*, el *tornasol*, etc.

Becquerel ha demostrado por medio del fosforoscopio que la fluorescencia de los sólidos es una fosforescencia que dura poco. Ningún líquido fluorescente es luminoso en el fosforoscopio; no por eso hay que deducir que la fluorescencia es instantánea, sino que dura brevísimo tiempo después de la acción de la causa excitadora.

2º *Explicación de la fluorescencia. — Ley de Stokes.* — La luz emitida por fluorescencia se limita a la superficie de los cuerpos. Todas las sustancias que presentan esta propiedad, tienen un espectro de absorción y transforman inmediatamente en luz de fluorescencia la energía luminosa absorbida. A este caso se puede aplicar también la ley de Stokes : la luz de fluorescencia es siempre menos refrangible que la luz excitadora.

Las radiaciones más refrangibles son las que excitan al máximum la fluorescencia, lo mismo que la fosforescencia. Esto se puede demostrar repitiendo un interesante experimento de Stokes. Se hace incidir sobre la superficie de un líquido fluorescente un espectro completo horizontal, y se ve que el líquido se ilumina vivamente en el ultra-violado y más o menos en la parte visible desde el violado. Esta propiedad se ha utilizado para hacer visible la parte ultra-violada del espectro, que aparece así con sus rayas. Se hace incidir el espectro ultra-violado en un vaso de urano, y las rayas brillantes que se ven son análogas a las del espectro visible. La ley de Stokes se aplica a la fluorescencia como a la fosforescencia, con la misma restricción. Los rayos X y los rayos del radio excitan la fluorescencia como la fosforescencia.

COLORES DE LAS RADIACIONES Y DE LOS CUERPOS

641. **Colores de las radiaciones. — Luz blanca.** — Las radiaciones del espectro visible se nos antojan diversamente coloreadas. La radiación solar, que las contiene a todas superpuestas, nos parece blanca : llámase la *luz blanca*.

La luz blanca es, pues, una luz compuesta, formada por la superpo-

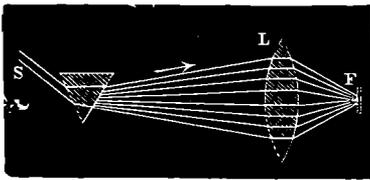


Fig. 650.

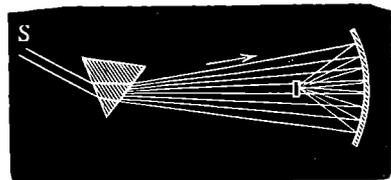


Fig. 651.

sición de las diversas radiaciones luminosas enviadas por el sol. Newton, después de *descomponer* la luz blanca del sol por el prisma, demostró que se la podía *recomponer*, superponiendo las diversas luces simples del espectro solar. He aquí algunos de sus experimentos.

1º Se hace incidir el espectro procedente de un haz de rayos solares dispersos por un prisma, en una lente convergente acromática (fig. 650) o en un espejo cóncavo (fig. 651). Estos aparatos hacen converger todas las radiaciones en un plano próximo a su plano focal. Si, en este punto, en que están superpuestas las radiaciones coloreadas, se coloca una pantalla blanca, se la ve iluminada por una luz blanca, como la luz del sol que da en el prisma.

2º *Disco de Newton*. — En un disco de cartón (fig. 652) hay pintados sectores que representan todo lo exactamente posible los colores del espectro. Se hace girar este disco rápidamente alrededor de una varilla



Fig. 652.

cilíndrica que lo atraviesa por su centro, y parecerá blanco, o mejor dicho, blanco grisáceo. Este experimento demuestra que si los colores del espectro se suceden rápidamente en un mismo punto de la retina, producen el mismo efecto que si estuvieran superpuestos simultáneamente. Este es un fenómeno del mismo orden que la persistencia de las impresiones luminosas en la retina.

642. **Colores de los cuerpos.** — **Colores complementarios.** — Los cuerpos opacos, iluminados por la luz blanca del día, nos parecen ora blancos, ora negros, o bien coloreados de diversos tonos. Un cuerpo parece blanco cuando envía en igual proporción las diversas radiaciones visibles que constituyen la luz blanca. Parece negro, cuando no devuelve ninguna radiación y las absorbe todas. En fin, los diversos colores son consecuencia de la variación de los poderes reflector y difusivo con la naturaleza de la radiación. Los cuerpos coloreados nos transmiten ciertos colores contenidos en la luz solar con más intensidad que otros: de ahí, nace una impresión en que domina el color por el que el cuerpo tiene mayor poder reflector o difusivo. Además, el color varía con el foco de luz. Por ejemplo, un cuerpo rojo nos parece así porque, entre todas las radiaciones de la luz blanca, no devuelve más que el rojo; este mismo cuerpo parecerá negro si se le dirige la luz de un mechero Bunsen que contiene sodio, porque esta llama sólo contiene luz amarilla, que es absorbida por el cuerpo. De este modo, se comprende el por qué ciertos colores parecen cambiar a la luz de una lámpara o del gas.

Análisis físico de los colores. — Se corta una banda estrecha del cuerpo cuyo color se quiere analizar, se la fija en un fondo negro y se la ilumina fuertemente. Mirando con un prisma, a la distancia de uno o dos metros, la luz reflejada o difundida por la pequeña banda, se la descompone y se analizan los colores simples que constituyen el color propio del cuerpo. De esta manera se ha probado que *el color es compuesto en todos los cuerpos*. Por ejemplo, los pétalos de las flores dan un espectro matizado con varios colores del espectro.

Color de la luz transmitida por un cuerpo transparente. — Los colores que presenta la luz después de atravesar cuerpos transparentes coloreados se explican del mismo modo. Por ejemplo, un cristal rojo, coloreado con subóxido de cobre y expuesto a la luz solar no deja pasar más que los rayos rojos. Si miramos un cuerpo a través de ese cristal rojo y si, entre las radiaciones compuestas que el cuerpo envía, hay rayos rojos, el cuerpo se nos antojará rojo; de lo contrario, nos parecerá negro.

En general, el color de la luz que atraviesa un cuerpo transparente

procede de la superposición de las radiaciones que deja pasar y que estaban contenidas en la luz que lo ilumina.

Colores complementarios. — Newton llamó *colores complementarios* a los que, al superponerse, producen el blanco. El verde es complementario del rojo, el azul del anaranjado, el violado del amarillo. Todo color tiene otro que le es complementario; pues no siendo blanco, le faltan algunos de los del espectro para dar luz blanca; la mezcla de estos últimos colores debe producir, en consecuencia, un color compuesto complementario del primero. De modo que los colores complementarios pueden ser a su vez simples o compuestos.

Es fácil distinguir los colores complementarios de los del espectro. Para esto, no hay más que emplear uno de los aparatos (fig. 650 y 651) que nos han servido para recomponer la luz blanca. Si se cubre con una pantalla un color del haz coloreado que se difunde entre el prisma y la lente (o el espejo cóncavo), faltará este color en la recomposición; la mancha luminosa observada en el foco de la lente o del espejo cóncavo no puede ser blanca, y posee evidentemente el tono complementario del color interceptado.

CAPÍTULO X

FOTOGRAFÍA. — ACCIONES QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE LAS RADIACIONES

643. **Definición.** — **Cámara oscura.** — La fotografía permite fijar las imágenes de los objetos por la acción de la luz sobre diferentes sustancias sensibles a esta acción.

Este arte es descubrimiento francés, debido a los trabajos comunes de Niepce y de Daguerre.

Cámara oscura fotográfica. — Para formar la imagen de los objetos que se desea reproducir, úsase el sencillísimo aparato conocido con el nombre de *cámara oscura*. Compónese esencialmente de un objetivo

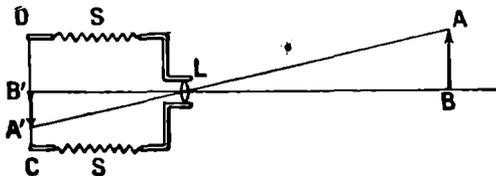


Fig. 653.

convergente L (fig. 653), que puede dar de un objeto exterior AB una imagen A'B' real e invertida. Así se consigue formar esta imagen en una placa cubierta de una sustancia sensible a la luz.

Como la posición de la imagen A'B' varía con la distancia del objeto AB, para que la imagen corresponda a todas las posiciones del objeto es

preciso que la placa CD pueda acercarse más o menos al objetivo. En la mayor parte de los aparatos, se empieza a enfocar en CD, sobre una placa de vidrio sin pulimento que se puede acercar al objetivo o alejarla de él, la cual se reemplaza luego por la placa sensible. La parte movable CD está reunida con la fija L por medio de un fuelle de cartón cubierto de tela negra que no deja pasar la luz. Una base o *cola ll* (fig. 654) que sostiene la parte anterior y la posterior, permite acercarlas o alejarlas para efectuar el enfocamiento.

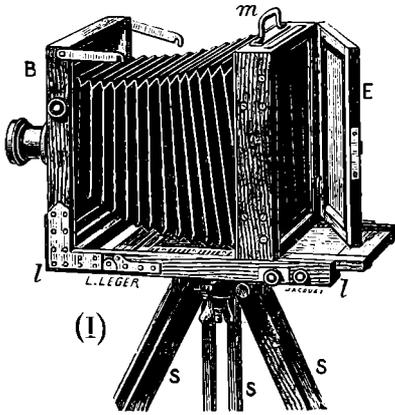


Fig. 654.

La figura 654 representa una cámara de fuelle provista de su objetivo, montada sobre un trípode fijo SS, con su pantalla de vidrio sin pulimentar E medio abierta.

Las capas sensibles, placas o películas, se transportan a la cámara obscura sin que les dé la luz, por medio de aparatos especiales llamados *bastidores negativos* o sencillamente *bastidores*.

Hay varios modelos : *el de ventanas* es el más usado. Hácesele siempre doble (fig. 655). Las placas están separadas por una pared opaca y mantenidas con pequeños tacos. Un muelle de presión central aplica las placas contra los tacos y las mantiene en posición. La figura 655 (I y II) representa un bastidor doble de ventanas, abierto (I) y cerrado (II).

También se fabrican *bastidores de cortinas* (fig. 656) en que las ven-

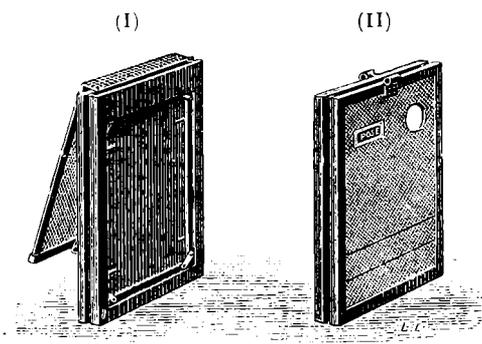


Fig. 655.

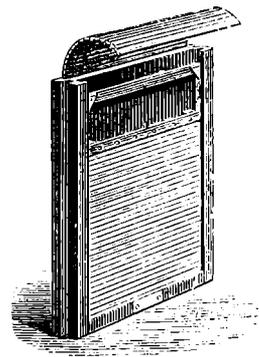


Fig. 656.

tanas, en vez de ser rígidas, son flexibles, por estar formadas de pequeñas laminillas de madera pegadas sobre tela.

Finalmente, constrúyense también *bastidores de rodillos* para uso de las películas sensibles.

644. **Objetivos fotográficos y diafragmas.** — Los objetivos fotográ-

ficos están compuestos de uno o de varios sistemas de lentes que son *acromatizadas* al mismo tiempo para los rayos violetados y amarillos. Están provistos de *diafragmas móviles* de aberturas variadas que permiten modificar la cantidad de luz que entra en el aparato (fig. 657 y 658).

En los objetivos simples, el diafragma está colocado delante de la lente; en los dobles, se halla entre las dos lentes.

El uso de los diafragmas tiene por objeto eliminar los rayos periféricos o demasiado oblicuos, y por consiguiente mejorar el aplanetismo del objetivo y la claridad de la imagen.

Un diafragma se compone esencialmente de una abertura circular más o menos grande. Tal es el *giratorio* de la figura 657 que es un

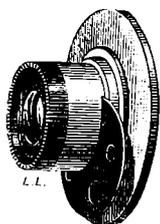


Fig. 657.

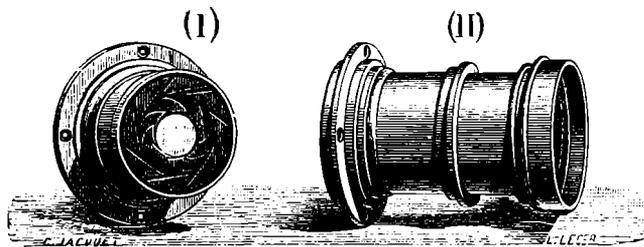


Fig. 658.

disco de varias aberturas, giratorio delante de la lente de un objetivo gran angular de corto foco, y que permitirá fotografiar desde muy cerca los grandes monumentos.

Se emplea frecuentemente el *diafragma-iris* (fig. 658, I y II) : está formado de una serie de laminillas (I), que se pueden mover desde el exterior de modo que se realicen todas las variaciones de abertura.

Diversos objetivos empleados en fotografía. — Los objetivos *simples*, de una sola lente acromatizada, exigen tener poderosos diafragmas. Por lo tanto, son poco luminosos. Además, proporcionan gran distorsión a la imagen y, por esta razón, no pueden emplearse más que para paisajes. Los objetivos dobles son preferibles, porque la distorsión originada por una de las lentes queda anulada por la distorsión que, en sentido contrario, produce la otra lente. Tales son los objetivos llamados *rectilineales*. En fin, los objetivos *anastigmáticos* corrigen los defectos del astigmatismo.

Constrúyese también objetivos triples, como el triplete de Dallmeyer y el de Zeiss.

La iluminación de la imagen fotográfica, que permite la mayor o menor rapidez de exposición, depende al mismo tiempo del diámetro del diafragma y de la distancia focal del objetivo.

La cantidad de luz que se esparce por la imagen es, en efecto, proporcional a la superficie del diafragma y, por consiguiente, varía en razón directa del cuadrado del diámetro de éste. Por otra parte, la magnitud de la imagen por que se esparce esta luz es proporcional a la distancia focal del objetivo (cuando la imagen está en el plano focal, es decir, cuando el objeto se halla muy distante, que es el caso más general). Su superficie es, pues, proporcional al cuadrado f^2 de la distancia focal y, en consecuencia, la iluminación varía en razón inversa de f^2 .

Los objetivos son tanto más rápidos cuanto mayor sea el diafragma con que su aplanetismo permita emplearlos.

Abertura útil. — Llámase abertura útil de un objetivo el diámetro del haz incidente paralelo que puede penetrar a través del diafragma.

En los objetivos simples en que el diafragma está situado antes que el objetivo, la abertura útil es igual al diámetro del diafragma; pero, en los objetivos compuestos es

más grande, a causa de la retracción que sufre el haz a través del primer cristal, antes de atravesar el diafragma.

Numeración de los diafragmas. — Según la decisión del Congreso fotográfico de 1900, los diafragmas se numeran con una fracción de la forma $\frac{F}{n}$, en que n es el número obtenido dividiendo la distancia focal por la abertura útil del diafragma. Así, el símbolo $\frac{F}{8}$ se refiere a un diafragma cuya abertura útil es $\frac{1}{8}$ de la distancia focal del objetivo.

Claridad de un objetivo. — Denominase claridad de un objetivo la relación entre la iluminación de la imagen de un objeto en el infinito, dada por este objetivo, y la iluminación de la imagen del mismo objeto suministrada por un objetivo tipo en que el diámetro de la abertura útil es la décima parte de la distancia focal. Los objetivos en los cuales la abertura útil es menor que $\frac{f}{10}$ son poco claros. Un objetivo que alcance una abertura útil $\frac{f}{5}$ es, en cambio, luminoso.

Profundidad de foco. — La profundidad de foco es la longitud en que se puede mover la placa sin que la imagen deje de ser clara en ella. Depende de la distancia focal del objetivo, de la distancia del objeto en que se enfoca y del límite de limpieza que se conviene adoptar. Para la fotografía ordinaria, el máximo de precisión se obtiene evidentemente cuando el *clisé* presenta los detalles que percibe la vista. Ahora bien, la vista distingue dos puntos que, distando $\frac{1}{10}$ de milímetro, estarían colocados a 30 centímetros del ojo (distancia angular $\frac{1}{3000}$ de radián). En este caso, la profundidad de campo es la separación a que se puede colocar la placa para que las imágenes de puntos cuya distancia angular es $\frac{1}{3000}$ de radián queden separadas. Esto produce una claridad extrema; llámase *claridad de $\frac{1}{10}$* . A veces, basta la claridad de $\frac{1}{4}$, en la que el objetivo separa dos puntos cuya distancia angular es $\frac{1}{1200}$ de radián, como son puntos distantes $\frac{1}{4}$ de milímetro y colocados a 30 centímetros del ojo. La profundidad de foco admisible es 4 veces más grande en el segundo caso que en el primero.

Profundidad de campo. — Estando enfocada la placa respecto de un objeto que se halle a distancia determinada, llámase *profundidad de campo* al movimiento que puede darse al objeto, sin que la imagen deje de ser clara. Como la profundidad de foco, la de campo depende de la distancia del objeto, de la distancia focal del objetivo y del grado de claridad admitido.

Angulo abarcado por un objetivo. — Los objetivos se clasifican también según el ángulo que abracen. Varía entre 10° y 40° , en los objetivos ordinarios; de 40° a 60° , en los llamados *semigrandes ángulos*, y de 60° a 110° , en los objetivos que se denominan *grandes ángulos*.

645. Exposición. — Para sacar una fotografía, una vez cubierto el objetivo, se coloca en el aparato el bastidor que contiene la placa sensible, se abre, descubriendo el objetivo y se deja que actúe la luz durante un tiempo variable, según las condiciones de la operación.

La determinación del tiempo de exposición es uno de los problemas más complicados de la fotografía, porque su solución depende de numerosos factores: sensibilidad de la placa, abertura y foco del objetivo, distancia y coloración del modelo, actinismo de la luz, el cual depende, a su vez, de la latitud, la estación, la hora, el estado atmosférico, etc.

En la práctica, se procura *exceder* siempre del tiempo normal que parece necesario. En efecto, por medio de la revelación, siempre se puede moderar el acceso de una imagen *sobreepuesta*, mientras que

en caso de *subexposición* el operador más diestro no puede hacer aparecer lo que la luz no ha impreso.

646. **Fotografía instantánea.** — En la fotografía instantánea se pueden incluir todas las aplicaciones en que la duración de impresión se reduce a *un instante*, es decir, a una fracción de segundo extremadamente pequeña, ya gracias al empleo de un órgano especial llamado *obturador*, ya por el hecho de que la placa reproduce un fenómeno que es, por sí mismo *instantáneo*, como un *relámpago de tormenta* o una chispa eléctrica.

La fotografía instantánea permite reproducir los más variados objetos en movimiento. No es preciso que el aparato fotográfico descanse en un trípode sólido; se puede operar a mano. Y hasta el mismo operador puede estar en movimiento, en un barco, en carruaje, en tren, en globo.

Experimentos de Janssen. — Janssen ha podido, reduciendo la impresión a $\frac{1}{3\,000}$ de segundo, reproducir diversos pormenores de la superficie solar relativos a la estructura del núcleo y de la cromosfera, las fáculas, las arrugas, las manchas de la fotosfera, etc.

Experimento de Angot. — Análogamente, Angot ha obtenido los más delicados pormenores de ciertas masas nubosas muy ligeras que se confunden con el azul del cielo.

Para obtener imágenes satisfactorias en estas circunstancias, es preciso combinar las diversas condiciones del experimento : sensibilidad de la capa fotográfica, rapidez del objetivo (caracterizada por su foco y su abertura), iluminación del modelo, energía de la revelación.

Obturadores. — Llámense obturadores unos aparatos cuyo objeto es no dejar penetrar la luz sino durante breve tiempo, que debe ser siempre igual para un mismo grado de regulación. El número de obturadores es considerable. Citaromos los siguientes :

1º *Obturador lateral* que consta de laminillas taladradas por aberturas triangulares o en sector circular, al que un resorte hace pasar rápidamente delante del objetivo por un movimiento rectilíneo o circular. Muévense estos obturadores, apoyando sobre un botón que deja en libertad la laminilla y hace funcionar al resorte, o bien por medio de un mecanismo neumático que funciona por la presión de una pera de goma.

2º *Obturador de ventana.* — Consiste en una ventanilla o pantalla horadada por una hendidura que se hace funcionar contra la misma placa. Janssen lo empleó en la fotografía del sol y Marey en el estudio de los movimientos. Es el que permite obtener exposiciones más cortas.

647. **Fotografía con luz artificial.** — Gracias a los progresos realizados en la sensibilidad de las preparaciones fotográficas, es posible operar hoy muy fácilmente con focos de luz artificial, eléctrica, magnesio, etc.

Este último, usado en estado de polvos impalpables, solo o con sustancias oxidantes y proyectado en una llama, da resplandores de considerable intensidad, lo cual ha permitido operar en sitios mal alumbrados o completamente oscuros : interior de las casas, teatros, grutas, cavernas, etc.

648. **Placas al gelatino-bromuro de plata.** — Las placas sensibles se recubren de una emulsión de bromuro de plata en gelatina; llámense éstas, placas al *gelatino-bromuro de plata*.

La preparación y manipulación de las placas se debe hacer siempre a la luz roja que no las impresiona. Por eso todo fotógrafo debe tener

un laboratorio completamente obscuro y que sólo reciba la luz de linternas con vidrios rojos o de vidrieras rojas que no dejen pasar ninguna traza de verde o amarillo.

Preparación de las placas sensibles. — La emulsión de gelatino-bromuro consiste esencialmente en un precipitado de bromuro de plata mantenido en suspensión en la gelatina. Este precipitado se obtiene por doble descomposición, añadiendo nitrato de plata a una solución caliente de gelatina que contiene ya un bromuro.

Es conveniente lavar con cuidado la emulsión, para limpiarla de las sales solubles que contiene.

Las placas de gelatino-bromuro de plata se preparan en la industria por medio de máquinas especiales, que garantizan gran regularidad de fabricación y producción considerable.

649. Revelación. — Cuando se saca la placa del bastidor después de la exposición, no presenta ninguna traza de imagen; la operación que se efectúa para que aparezca se llama *revelación*, que consiste en el uso de reductores enérgicos, llamados *reveladores*: el pirogalol o ácido pirogálico, la hidroquinona, el paramidofenol adicionados con un álcali, el diamidofenol, el metol (sulfato de metilparamidofenol), * etc.

En la práctica se usan sustancias destinadas a retardar, o por lo menos a impedir la combinación del reductor con el oxígeno del agua: tienen el nombre de *conservadores*.

Otras sustancias, tales como los bromuros y ciertos ácidos (cítrico, fórmico, tártrico), constituyen *retardadores*. Por fin, los *aceleradores* tienen como misión precipitar la aparición de la imagen.

Los mejores métodos para revelar son los procedimientos por ácido pirogálico y diamidofenol.

1º Revelación con ácido pirogálico. — En este caso, son necesarios los productos siguientes.

A	Ácido pirogálico en polvo	
B	Sulfito de sosa	25 gr.
	Agua	100 —
C	Carbonato de sosa (del comercio)	25 —
	Agua	100 —
D	Bromuro de potasio	10 —
	Agua	100 —

Por ejemplo: para un clisé 13/18, se forma un baño con

A	0,15 a 0,20 g
B	20 cm ³
D	alg. gotas
Agua	80 cm ³

Después de algunos instantes pasados en este baño, se añade la solución C por pequeñas dosis hasta que la imagen surja. Entonces se la deja subir tranquilamente, agregando álcali si los pormenores son insuficientes o reductor si falta la intensidad.

2º Revelación con diamidofenol. — El baño normal se obtiene disolviendo en 100 gramos de agua: 4 gramos de sulfito de sosa anhidro y 0 gr. 5 de clorhidrato de diamidofenol. Si la placa está muy impresionada, se aumenta la dosis de diamidofenol que entonces

* Numerosos cuerpos pertenecientes a la clase de los fenoles diatómicos o triatómicos, de los naftoles y amoníacos compuestos, gozan de las mismas propiedades.

obra como retardador: pero si está poco impresionada se aumenta la proporción de sulfito.

650. Operaciones subsiguientes a la revelación. — *Fijación de la imagen.* — Esta operación tiene por objeto eliminar las sales de plata no reducidas por la luz. Para ello se emplea una solución de hiposulfito de sosa a 20 p. 100. La placa debe permanecer en ella hasta que desaparezca todo aspecto lechoso de la capa.

Lavado. — Después se procede al lavado muy largo que tiene por objeto eliminar de manera absoluta todo rastro de hiposulfito de sosa. La conservación de las negativas no puede obtenerse de otra manera.

Baño de alumbre. — Después de fijar se suele hacer uso de un baño de alumbre destinado a endurecer la gelatina y hacerla imputrescible.

Desecación. — Debe efectuarse al aire libre, al abrigo del polvo y a temperatura moderada, so pena de hacer fundir la gelatina. Dura de seis a doce horas próximamente.

Desecación rápida. — Basta introducir una placa en el alcohol metílico a 90°, durante cinco a diez minutos y después secarla. Entonces se la puede secar por medio de suave calor.

Curtimiento de la gelatina. — Lumière y Seyewetz han demostrado que poniendo, durante 3 minutos, la placa lavada en una solución a 15 por 100 de aldehído fórmico del comercio (formol) se hace insoluble la gelatina. Entonces se puede secar la placa al fuego. Esta operación se llama *curtimiento de la gelatina*.

651. Resultado de la revelación. — **Clisé negativo.** — Durante la revelación, en las partes de la placa que han recibido la acción de la luz, es decir las que corresponden a las partes claras de la imagen, se reduce el bromuro de plata y se deposita una capa negra opaca de plata pulverulenta. En las partes oscuras, por el contrario, no se ha reducido el bromuro, y al disolverle el baño de fijar la imagen, la gelatina queda transparente. De aquí resulta una imagen llamada *negativa*, porque es *negra* en las partes blancas del objeto, e inversamente. Esta prueba negativa es un verdadero *clisé* que puede dar el número que se quiera de pruebas positivas.

652. Retocado del negativo. 1º Si el negativo carece de detalles en algunas partes, no hay corrección verdaderamente eficaz, puesto que sería necesario reconstituir una imagen que no ha sido impresa por la luz.

2º En lo que se refiere a la intensidad del negativo, se la puede aumentar o disminuir de manera general, si es demasiado pequeña o considerable: la primera operación constituye el *reforzamiento*, la segunda la *rebaja*.

Reforzamiento con mercurio y con amoniaco. — Después de lavar bien el negativo, se le introduce en una solución de bicloruro de mercurio a 25 por 1000, hasta que la imagen aparezca enteramente blanca. Lávasse abundantemente y se pasa por el agua un tanto amoniacal. El color de la imagen pasa al pardo oscuro, y adquiere notable intensidad. Terminase con un buen lavado.

Rebaja. — Se prepara una solución de 50 gramos de hiposulfito de sosa y de 5 gramos de ferrocianuro de potasio en 1 litro de agua. Cuando se mete ahí el clisé la imagen desciende de manera regular y llega al punto apetecido. Se termina con un lavado abundante. El mismo resultado se obtiene con una solución a 4 p. 100 de persulfato de amoniaco.

3º *Retoque artístico.* — El retoque tiene por objeto quitar los defectos procedentes,

sea del tema fotografiado, sea del clisé. Efectúasele en el clisé negativo, por medio de un lápiz bien afilado, y en ocasiones con un pincel si se necesita acentuar más. Si el retoque debe hacerse en partes negras del negativo demasiado acentuadas que darían blancos demasiado crudos, entonces se recurre a una aguja con un mango, que permite marcar una serie de puntos muy ligeros o de estrías en esas sombras que se han de atenuar.

653. **Placas peliculares y películas.** — El vidrio tiene inconvenientes serios, al lado de notables cualidades de transparencia y de lisura : son su peso, su volumen y fragilidad.

Las *películas* son nuevos soportes preparados para reemplazar el vidrio : generalmente están formadas de celuloide o de gelatina insolubilizada. Se las prepara en rollos.

El celuloide, muy empleado en las películas (*film*) del cinematógrafo, tiene el grave inconveniente de ser muy inflamable. Ahora se le suele reemplazar por el acetato de celulosa.

También se puede separar la película de gelatina de un clisé ordinario del modo siguiente. Se impregna el clisé de una solución de formol y de carbonato de sosa, después se le sumerge en ácido clorhídrico muy diluido. El gas carbónico que se desprende, separa la película de su soporte.

654. **Tirada de las pruebas fotográficas o positivas.** — Obtenido que sea el clisé, trátase de reproducirlo en papel :

1º *Preparación del papel sensible.* — En el comercio se encuentran diversos papeles sensibles. Los actualmente empleados están cubiertos de una capa de gelatina, impregnada de cloruro de plata, adicionado con una sal de plata soluble, que, generalmente, es citrato. Expuestos a la luz, se ennegrecen, por la formación de un depósito de plata reducida.

2º *Tirada.* — Colócase el clisé en un bastidor prensa A (fig. 659) que

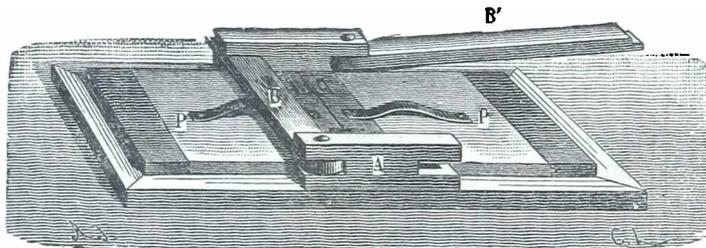


Fig. 659.

se compone de un marco de madera A, en cuyo fondo hay un cristal y además de una plancheta doble de charnela P y de dos cerradores de muelle BB'.

Colócase el clisé sobre el cristal, con la capa hacia arriba, y después el papel sensibilizado, con su parte sensible hacia abajo. Encima de este papel se pone un cojinete o colchoncillo de paño o de papel, destinado a comunicar impresión igual a toda la superficie.

Dispónese la plancheta de charnela y se cierra el bastidor por medio de los muelles P y P'; gracias a la presión uniformemente repartida, el papel queda bien sentado sobre todos los puntos del clisé. Expoñiendo el bastidor a la luz, se obtendrá una imagen *positiva*, quiere decir en que a cada parte blanca y transparente del clisé, corresponderá una parte negra y en que por consiguiente los valores o tonos de la imagen del objeto fotografiado quedarán restablecidos.

De cuando en cuando, se mira, levantando uno de los lados del bastidor, si la tirada *ha venido* suficientemente. Cuando la exposición es bastante, se retira la hoja y se efectúan las operaciones siguientes :

3º *Lavado de las pruebas.* — Las pruebas se lavan con agua ordinaria durante algunos minutos, a fin de eliminar parte del nitrato de plata que retienen. Este exceso de nitrato tendría el inconveniente grave de ocasionar manchas en el virado y agotar rápidamente el baño.

4º *Virado.* — El virado tiene por objeto, primero reemplazar la plata reducida, que es alterable al aire, por oro, que es inalterable, y después dar a las fotografías un tono purpurino muy suntuoso, variable dentro de ciertos límites. El baño de virado se compone de una solución de cloruro de oro (a 1 milésimo), a la cual se añade una proporción variable de sales alcalinas, tales como los borato, acetato, carbonato de sosa, etc.

Conviene agitar constantemente las pruebas en el baño.

5º *Fijar la imagen.* — Esta operación se efectúa dejando las pruebas de 10 a 15 minutos en un baño de hiposulfito de sosa (a 10 o 15 centésimos) que disuelve el cloruro de plata no reducido por la luz en la exposición fotográfica : después se lavan las pruebas.

6º *Lavado.* — El lavado es una operación *esencial* para la conservación de las pruebas. En efecto, si quedaran en ellas algunos restos de hiposulfito, al cabo de cierto tiempo de exposición al aire húmedo se desprendería ácido sulfhídrico, que daría con la plata de la imagen un sulfuro de plata, el cual se transformaría lentamente en sulfato que, no obstante su escasa solubilidad, se disolvería poco a poco, acabando por desaparecer.

En otro tiempo se lavaba con dos o tres aguas; hoy se lava en agua corriente por espacio de varias horas.

655. *Otros precedimientos fotográficos.* — 1º *Procedimiento de las sales de platino.* — Este procedimiento se funda en la propiedad que tiene una mezcla seca de cloruro de platino y de oxalato de hierro de reducirse por acción de la luz, dando una imagen negra producida por el platino reducido. Se la revela en un baño caliente de oxalato de potasa, y después se la fija en una solución dilatada de ácido clorhídrico.

Este nuevo procedimiento permite obtener pruebas positivas enteramente inalterables y de mayor valor artístico que las precedentes. Además da medios de hacer indiferentemente clisés en papel, en madera, telas, marfil, etc.

2º *Procedimiento de las sales de hierro.* — Tiene por base la acción de la luz sobre las sales férricas y la acción del ferrocianuro de potasa. Según el modo de operar, resultan imágenes *azules* sobre fondo *blanco*, o *blancas* sobre fondo *azul*. Estos procedimientos se usan sobre todo en la industria para la reproducción directa de los planos dibujados en tela o papel transparente. Por la acción del ácido gálico se pueden obtener pruebas *negras* sobre fondo *blanco* (Colas).

3º *Procedimiento del carbón.* — Este procedimiento da imágenes muy artísticas y de gran estabilidad. Lo ha indicado Poitevin. El principio en que se funda es el siguiente. Por acción de la luz, la gelatina bicromatada se hace insoluble en el espesor de la capa, proporcionalmente a la intensidad de la luz que la ha penetrado. Si en esta gelatina bicromatada pegada en papel se incorpora previamente una materia colorante estable en estado de polvos muy finos, las partes que se han hecho insolubles retendrán la materia colorante, proporcionalmente a la acción de la luz que atraviesa el negativo, mientras que las partes que siguen siendo solubles, desaparecerán por la acción de un disolvente apropiado (agua caliente). De manera que la imagen quedará constituida por gruesos más o menos grandes de gelatina coloreada.

4º *Positivas en cristal o diapositivas.* — Se hacen magníficas positivas en cristal colo-

cando detrás de un *clisé* una placa sensible y exponiéndola a la luz. Es preferible operar a la luz artificial de una lámpara o una bujía y colocándose a medio metro o un metro de distancia. Se revela y luego se fija la placa como un *clisé*. Las positivas obtenidas de este modo deben mirarse al trasluz por lo cual llevan el nombre de *diapositivas*.

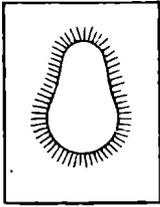


Fig. 660.

5º *Ampliaciones fotográficas*. — Se pueden obtener positivas fotográficas más grandes que el *clisé*. Para esto, proyéctase, con una linterna de proyección, la imagen ampliada del *clisé* en una hoja de papel al gelatino-bromuro de plata, y se revela y fija en seguida.

6º *Degradados fotográficos*. — Ciertas fotografías sobre fondo blanco adquieren mayor mérito artístico por medio del degradado, que tiene como fin aumentar el parecido entre la fotografía y el grabado o un dibujo al lápiz. El degradador más sencillo y menos costoso consiste en un pedazo de cartón fino, en el cual se hace una abertura del tamaño de la parte de la fotografía que se quiere reproducir. Se hacen con tijeras unas incisiones en el borde, como lo indica la figura 660, y se le coloca delante del *clisé* durante la tirada de la prueba. La penumbra que dan los bordes recortados producen el degradado.

656. *Fotografía micrográfica*. — Es una nueva rama de la fotografía, que estudia los dos problemas siguientes :

1º Fijar, mediante procedimientos fotográficos ordinarios, las imágenes ampliadas de los objetos microscópicos (*fotomicrografía*).

2º Obtener imágenes microscópicas de objetos de magnitud ordinaria, de modo que se reúna gran número de pruebas en poco espacio.

1º *Fotomicrografía*. — La disposición más sencilla consiste en sustituir el objetivo ordinario de una cámara oscura por un microscopio* y se ilumina bien con un espejo el pequeño objeto, cuya imagen agrandada va a proyectarse en la pantalla de la cámara oscura y a imprimirse en la placa sensible.

2º *Pruebas microscópicas*. — El segundo problema ha sido resuelto primeramente por los métodos y aparatos de Bertsch, completados y perfeccionados luego por Neyt, Dagrón, Moitessier y Girard. Así se ha logrado obtener esas fotografías imperceptibles que se engarzan en una armadura cualquiera y que miradas con el vidrio de aumento adquieren las proporciones de las pruebas ordinarias.

Por este método se expidieron desde París a las provincias de Francia, durante el asedio de 1871, largos y voluminosos despachos reducidos a una superficie microscópica y a un peso minúsculo. Dagrón usaba delgadas películas de colodión, bastante sensibles para no exigir sino *dos segundos* de impresión. En cada una de ellas se podían fotografiar de 12 a 16 páginas en folio, que contenían por término medio 3 000 despachos; 18 de estas hojas introducidas en un tubo de pluma, pesaban próximamente medio gramo y constituían la carga de una paloma mensajera. Cuando llegaban a su destino se los ampliaba, proyectándolos en una pantalla, por medio de un microscopio fotoeléctrico.

657. *Procedimientos mecánicos*. — En los procedimientos mecánicos de tirada de las pruebas fotográficas, la luz interviene únicamente para hacer una plancha que se tira, luego, por los procedimientos ordinarios de la litografía, de la tipografía o de la talla dulce.

I. *Impresión sobre superficies continuas : Fotolitografía y fotocolografía*. — Cúbrese una superficie unida (piedra, zinc) con una sustancia sensible a la luz (betún de Judea, gelatina o albúmina bicromatadas), y luego se la expone debajo del negativo**. Después de insolación, las partes no insoleadas son disueltas en disolventes apropiados, y después se da tinta a la superficie como en los métodos litográficos. Aquí no interviene la fotografía más que para dar con mayor precisión el dibujo sobre la superficie litográfica : tal es la *fotolitografía*.

En la *fotocolografía* se expone a la luz debajo del negativo una capa de gelatina bicromatada, extendida sobre un vidrio o soporte rígido, y luego se la lava abundantemente para que se elimine todo el bicromato. Bajo la influencia de la luz, la insolubilización de la capa es proporcional a los valores del negativo.

Si se da tinta a la plancha en estas condiciones después de mojarla, la tinta grasa no cogerá más que encima de las partes atacadas por la luz, proporcionalmente a su grado

* En estas condiciones, el microscopio ordinario puede dar imágenes reales ampliadas y rectas con relación al objeto.

** Este procedimiento no puede aplicarse más que a la reproducción de los negativos de tonos sombreados : sólo pueden componerse de negros y de blancos.

de insolación, mientras que será rechazada en las otras. Poniendo una hoja de papel sobre esa matriz, se tirará en la prensa. Este procedimiento es uno de los más perfectos indicados hasta hoy, pues permite reproducir con la mayor perfección los negativos de tonos sombreados.

II. *Impresión sobre superficies discontinuas.* — Aquí tendremos que distinguir los procedimientos que dan planchas on relieve o huecas.

Planchas en relieve. — *Fotograbado y similigrabado.* — En los clisés de fotograbado y de *similigrabado*, las partes del modelo que deben aparecer en negro en la prueba, resultan en relieve. La tirada se hace por la tipografía; se da tinta al clisé y las partes en relieve retienen la tinta que queda impresa en el papel. Empléase el fotograbado para reproducir los *dibujos perfilados*, tales como las figuras esquemáticas de esta obra, que no contienen más que blancos y negros, sin medias tintas. El *similigrabado* se aplica para reproducir asuntos de modelos continuos, tales como las figuras 613 y 614.

Lo que caracteriza los fotograbados y similigrabados, es que los clisés pueden ser intercalados en las planchas tipográficas en la misma impresión. Los similigrabados reemplazan ahora los antiguos grabados en madera.

1º *Fotograbado.* — Se fotografian en tarjeta blanca los dibujos a la tinta de China. Por otra parte, se prepara una plancha de cinc cubierta con una capa de albúmina bicromatada, y se la pone al sol debajo del negativo; en seguida se la cubre de tinta grasa y se la lava en agua; la albúmina que no ha recibido luz se disuelve llevando consigo la tinta que la cubría. Entonces aparecen los rasgos del dibujo on negro sobre fondo blanco. Se refuerza la tinta con polvos de cera y resina; y se calienta ligeramente la placa para ablandar estas substancias, que forman así, en los rasgos, una capa capaz de resistir el mordente. En seguida se ataca la placa de cinc con ácido nítrico diluido, que muerde el cinc en las partes no cubiertas. Por fin se clava en un bloque de madera el clisé así obtenido. También se hacen clisés en cobre; y en este caso el mordente es una solución de percloruro de hierro.

2º *Similigrabado.* — Para esto es necesario transformar los modelos continuos en negativos, que sólo tengan negros y blancos. En este caso, se fotografía el asunto (que es generalmente un positivo fotográfico), poniendo delante de la placa sensible, y a corta distancia, una *trama* formada de dos cristales acoplados, cada uno de los cuales tiene una fina red de líneas opacas equidistantes, formando un conjunto de mallas transparentes (las tramas tienen de 60 a 80 líneas por centímetro para los similigrabados de lujo, de 45 a 55 para las ediciones corrientes, de 25 a 40 para las ilustraciones de los periódicos). La interposición de esta trama transforma la imagen de modelos continuos en otra que presenta puntos blancos y negros. Por ejemplo, una media tinta aparecerá en forma de tablero de damas; otra más clara presentará un fondo blanco con puntos negros, otra más sombreada tendrá un fondo negro con puntos blancos.

Hay que advertir que la imagen debe ser invertida, para que la tirada en papel la haga aparecer en su verdadero sentido. Esta inversión se hace de varios modos: por ejemplo, después de la tirada, su desencola la película fotográfica y se la pone invertida en otro cristal. En seguida se pone a la luz, debajo del clisé fotográfico, la placa de cinc o de cobre, cubierta de gelatina bicromatada, y se procede a la operación del mordente, como para los clisés de fotograbados de perfiles.

Planchas en hueco. — *Heliograbado.* — En el heliograbado, las partes que deben aparecer en negro están huecas, como en las planchas de grabado on talla dulce o al agua fuerte, las partes blancas están unidas. La tirada se hace por los procedimientos ordinarios de los impresores en talla dulce. La plancha es de cobre; se le da tinta y se la limpia para quitar la tinta de las partes lisas; después se apoya contra la plancha un papel húmedo que penetra un poco en los huecos, cuya tinta conserva al retirarlo. Este procedimiento es el que da más bonitos grabados; pero requiere mucho cuidado.

1º *Caso de los dibujos perfilados.* — Se procede como para el fotograbado, pero poniendo a la luz la plancha debajo de un positivo. Debajo de los perfiles del dibujo no está insolubilizada la albúmina bicromatada; después de aplicado el mordente aparecen en hueco.

2º *Caso de los asuntos de modelos continuos.* — Los negros profundos y las medias tintas se deben seccionar en casillas estrechas, capaces de conservar la tinta, sino ésta desaparecería al lavado, como en las partes correspondientes a los blancos. Para seccionarlos se usan dos procedimientos. En el más perfecto, se extiende en la plancha de cobre polvos finos de resina. En seguida se calienta ligeramente la plancha, y así se ablandan los granos de resina y se pegan al metal. Se cubre la plancha con una capa de gelatina bicromatada y se la pone a la luz debajo del positivo fotográfico; y luego se usa el mordente do percloruro de hierro. Los granos de resina protegen el metal, que queda

hueco debajo de ellos; los negros y pardos están representados por multitud de huequitos (más profundos en los negros). Después del mordente se limpia la placa con potasa, agua caliente y esencia de trementina (para disolver la resina).

Tratándose de clisés baratos, se hace la tirada interponiendo una trama, como en el similgrabado, pero no directamente sobre la plancha, sino sobre papel a la gelatina bicromatada, cuya película se pone luego sobre un cilindro de cobre, usando en seguida el mordente de percloruro de hierro; este cilindro es el que sirve para la tirada en la prensa rotativa.

Hay que añadir que los clisés de fotografado se prestan, como los antiguos clisés en madera, a las diversas operaciones de galvanoplastia (992).

658. **Fotografía estereoscópica.** — Las pruebas fotográficas ordinarias no pueden dar la sensación del relieve de los objetos. Además, los objetos lejanos parecen, en general, mucho más pequeños, con relación a los que se encuentran en el primer plan. En las fotografías estereoscópicas quedan obviados estos inconvenientes.

Se efectúan fotografías estereoscópicas por medio de un aparato con dos objetivos cuya distancia es igual a la de los ojos y que, por tanto, produce un *clisé* doble. Luego, se sacan, al mismo tiempo, dos positivas que son análogas a las dos imágenes que se hubieran formado en los ojos por la observación directa. Y se mira ambas imágenes con un *estereoscopio*.

Estereoscopios. — En el estereoscopio de Weathstone, cada ojo mira a un espejo que refleja la imagen a él destinada. El estereoscopio de Brewster es el más empleado; las dos imágenes A y B (fig. 661), formadas con un aparato fotográfico doble, se hallan colocadas una al lado de otra. Los cristales a cuyo través se mira son prismas *m, n*; la arista está vuelta hacia dentro y es de superficies convexas que funcionan como lentes. Estos cristales superponen en C las imágenes de A y B, aumentándolas. Dicha superposición produce la impresión del relieve del objeto. El aparato óptico se coloca en una caja dividida en dos compartimientos, por un tabique opaco.

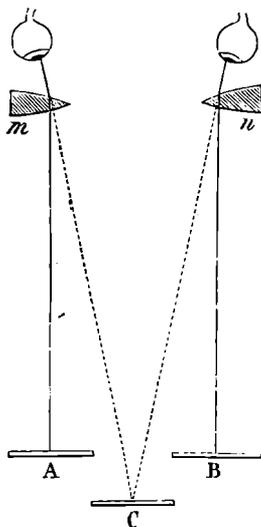


Fig. 661.

Procedimiento de las vistas superpuestas. — En este procedimiento, las dos vistas fotográficas están engastadas una en otra, en la misma placa.

La dificultad consiste en hacer visible para el ojo la imagen que le está destinada, con exclusión de la otra. Por lo cual, se emplea el procedimiento de las vistas coloreadas o el de redes.

Procedimiento de las vistas coloreadas. — Fue ideado por Ducos du Hauron. Se aplica con *clisés* obtenidos en dos exposiciones sucesivas, hechas moviendo lateralmente la cámara oscura, una cantidad igual a la distancia de los dos ojos. Con estos *clisés*, imprímense una sobre otra dos imágenes, una azul, con uno de ellos, y otra roja, con el segundo.

Supongamos, por ejemplo, que se imprima en rojo la imagen de la derecha, y en azul, la de la izquierda. Se miran las imágenes con unos lentes que tengan azul el cristal de la derecha y rojo el de la izquierda. De este modo, el ojo derecho no ve la imagen azul y la imagen roja lo parecerá *negra*. Luego el ojo derecho no verá más que la imagen que le está destinada. Asimismo, el ojo izquierdo no verá la imagen roja; pero verá la azul, en negro. En estas condiciones, aparece el relieve. Las imágenes así preparadas denominanse *anaglifos*.

Procedimiento de las redes. — Consiste en proyectar dos imágenes al mismo tiempo en la misma placa*; pero interponiendo ante la placa una red formada por trazos opacos paralelos y equidistantes, trazados en una lámina de cristal. De esta manera, obtiéndose dos imágenes superpuestas y confusas, atravesadas por bandas paralelas que corresponden a los trazos opacos de la red. Con este *clisé* se tira una diapositiva, la cual se examina con una red análoga a la precedente y se dispone de modo que sus trazos oscuros oculten al ojo derecho las partes de la imagen destinada al izquierdo, y, á éste,

* Se consigue, ya por medio de dos objetivos, ya mediante un objetivo ancho, detrás del cual hay una pantalla perforada por dos agujeros, ya también haciendo dos exposiciones sucesivas en la misma placa, moviendo lateralmente la cámara oscura, una pequeña cantidad.

las destinadas al otro. De esta manera, cada ojo ve la imagen que le está destinada, si bien atravesada por trazos negros, los cuales no tienen gran importancia. Este notable método fué inventado por Berthier, en 1896. Más recientemente, fué estudiado por Mussy y Guillon. En fin, Yves, en América y Estanave, en Francia, han obtenido, por él, notables *estereogramas*.

Esteroscopia en proyección. — Para obtener el relieve en las proyecciones luminosas se han efectuado numerosas tentativas. So puede, como han hecho Rollmann, Ducos du Hauron y Macé de Lépinay, proyectar vistas estereoscópicas coloreadas y observarlas con anteojos también coloreados, como hemos visto antes.

También se ha podido unir el relieve a las proyecciones cinematográficas. El método fué inventado por Dupuis y Schmidt. Consiste en proyectar en una misma región de una pantalla, dos bandas cinematográficas, correspondientes una al ojo derecho, y, al izquierdo la otra, estando la primera iluminada mientras la segunda sufre el movimiento necesario a la sustitución de una imagen por la precedente y viceversa. El observador mira a través de unos lentes, provistos de una paleta que oculta al ojo derecho la proyección destinada al izquierdo y reciprocamente. El efecto del relieve obtiéndose gracias a la persistencia de las impresiones en la retina.

También se obtiene el relieve estereoscópico en proyección por medio de redes lineadas. Con esto objeto Estanave ideó una pantalla formada por dos redes de líneas paralelas EE, E'E' (fig. 662), separadas por una pantalla traslúcida TT. Por un lado, proyéctanse dos imágenes estereoscópicas, I₁, I₂, en la misma región de la placa. El observador, colocado al otro lado de la pantalla, ve ambas imágenes a través de la segunda red. Supongamos los haces proyectados por los objetivos reducidos a sus ejes secundarios. Se ve que, gracias a la interposición de la pantalla TT las regiones señaladas con el número 1 pertenecerán a la imagen I₁, mientras que las regiones 2, pertenecerán a la imagen I₂. Se ve también que el ojo derecho O' verá, a causa de la interposición de la pantalla E'E', solamente las regiones 1, en tanto que el ojo izquierdo no verá sino las regiones 2.

También puede proyectarse en relieve la imagen de un objeto, proyectando en la pantalla dos imágenes de este objeto, por medio de dos objetivos.

Fotografías cambiantes. — También se puede imprimir en la misma placa dos imágenes, de tal manera que, si se mueve la vista o se vuelve ligeramente la placa, se ven sucesivamente las dos imágenes. De este modo la misma persona puede ser representada con dos expresiones diferentes.

Fotografía integral. — *Método de Lippmann.* — La fotografía estereoscópica ordinaria no da aún la impresión exacta de la realidad. En efecto, la vista directa hace ver no sólo los objetos en relieve, sino que su aspecto cambia con la posición del observador; los diferentes planos de la vista cambian entonces de lugar unos respecto de otros, la perspectiva se modifica y las partes ocultas varían también. En fin, si el espectador mira el mundo exterior por una

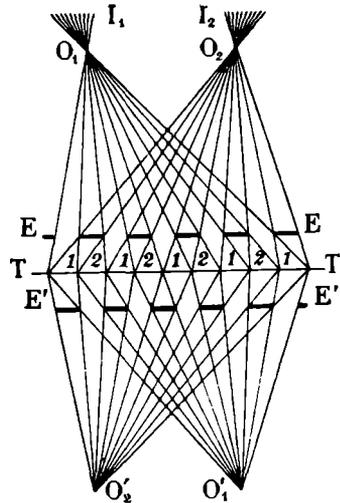


Fig. 662.

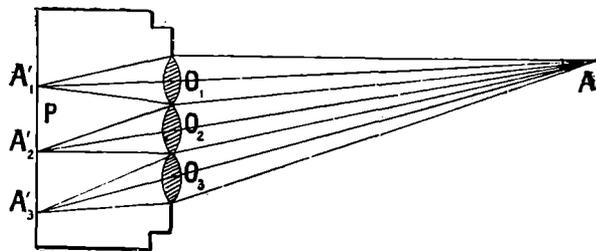


Fig. 663.

ventana, puede ver las diversas partes de un paisaje que vienen a colocarse sucesivamente entre los bordes de la ventana, de tal modo que, en este caso, son objetos diferentes que se le presentan sucesivamente. Lippmann ha imaginado un método fotográfico que permite reproducir la variedad que ofrece la vista directa de los objetos, y le ha dado el nombre de *fotografía integral*. He aquí su procedimiento.

En un aparato fotográfico corriente se reemplaza el objetivo por varios objetivos pequeños, 12 por ejemplo (en el plano de la figura 663 no hay más que 3), que forman en la placa *P* otras tantas imágenes distintas del asunto. Sea *A* uno de sus puntos y *A*₁, *A*₂, *A*₃ sus imágenes.

Si después de la exposición se revela la placa, se la coloca en *P* y se la ilumina por detrás, en virtud del regreso inverso de los rayos luminosos, cada objetivo dará de los puntos *A*₁, *A*₂, *A*₃ una sola imagen en *A*. En vez de observar esta imagen se tira un positivo sobre vidrio con el clisé, se le coloca en el plano focal común de los objetivos y se ponen los ojos en el otro plano focal. Entonces se tiene la visión exacta de la realidad: los ojos, al recibir los rayos que llegan de todas las imágenes, experimentan la impresión de una sola imagen en relieve y en tamaño natural y de aspecto variable según el punto de donde se mire.

FOTOGRAFÍA ORTOCROMÁTICA Y FOTOGRAFÍA DE LOS COLORES.

659. — **Fotografía ortocromática.** — La fotografía actual tiene un grave defecto: da imágenes en que los *valores* de los colores se reproducen mal, estando en cierta manera invertidos: el *azul*, que es el más oscuro de los colores, resulta *blanco*; el *amarillo*, el *verde*, el *rojo* salen *negros*. Por esto es que en un positivo fotográfico ordinario no se ve en claro más que el *azul*, y el *blanco*.

Placas ortocromáticas o isocromáticas. — El primer método propuesto para corregir esta imperfección fué el uso de placas llamadas *isocromáticas* u *ortocromáticas*. Se da este nombre a placas cuya sustancia sensible ha sido añadida con ciertas materias tintóreas que aumentan su sensibilidad para tal o cual radiación coloreada, y principalmente para las menos activas. Attout-Tailfert y J. Clayton fueron los primeros prácticos que obtuvieron industrialmente placas isocromáticas, introduciéndolas en el uso ordinario. Eran éstas de gelatino-bromuro sensibilizadas con *eosina*, para el *verde* y el *amarillo*. El número considerable de materias colorantes sintéticas que se preparan hoy día, se ha dado con sustancias capaces de hacer que las placas sean igualmente sensibles a todas las radiaciones (placas *pancromáticas*).

Método de G. Lippmann. — Después de haber colocado en la cámara oscura una placa Attout-Tailfer, se pone un *vidrio azul* delante del objetivo y se deja exponer el tiempo necesario para que los rayos *azules* de la imagen impresionen la placa. — Luego, sin tocar al aparato y cuidando bien de no moverlo, se reemplaza el vidrio azul por otro *verde**, y se continúa exponiendo tiempo bastante para que a su vez el *verde* impresione fuertemente la placa. — Por fin, llega el turno a los rayos rojos. Háceseles actuar sustituyendo delante del objetivo el vidrio verde por uno *encarnado*.

El resultado final de este método « de triple exposición », es dar fotografías ortocromáticas, quiere decir *claras*, sin *manchas oscuras*, en las cuales los árboles *verdes*, los cortinajes *amarillos*, etc., en vez de dar tonos oscuros, son representados por un dibujo finamente sombreado, como en un grabado bien hecho.

* De un verde muy puro, sin rastro alguno de azul.

660. — **Fotografía de los colores. — Método de M. Lippmann.** — Edmundo Becquerel obtuvo por primera vez en 1848 una imagen fiel del espectro solar. Y esta imagen coloreada podía conservarse indefinidamente en la obscuridad; pero una vez expuesta a la luz del día se ponía blanca enteramente. Luego el problema no estaba resuelto definitivamente.

En 1860, Carlos Cros y Ducos du Hauron inventaron separadamente un método indirecto para obtener *imágenes fotográficas coloreadas*. Más adelante (661), exponemos el fundamento de este método.

Método interferencial de G. Lippmann. — Lippmann ha obtenido una solución completa del problema sirviéndose de un método racional. Procedió de la teoría de la luz para definir *a priori* las condiciones en que hay que colocarse para obtener clisés coloreados mediante la aplicación directa de los procedimientos fotográficos ordinarios. Estas condiciones son dos.

1º Es preciso que la capa sensible sea *transparente y continua*, y no formada, como las emulsiones ordinarias, de granitos dispersos en la capa de gelatina :

2º Que esta capa sensible esté arrimada a un espejo.

Preparación de la emulsión. — Con el procedimiento siguiente se obtienen placas transparentes de gelatino-bromuro : se disuelven 5 gramos de gelatina en 100 gramos de agua y se agrega sucesivamente 0 gr. 35 de bromuro de potasio y 0 gr. 75 de nitrato de plata en polvo, procurando que la temperatura sea de unos 35º, pero que no pase de ahí. Entonces el bromuro de plata se precipita en forma coloidal transparente. Se ortocromatiza la emulsión con una mezcla de materias colorantes que la hace igualmente sensible a todas las radiaciones, sin que sea necesario interponer una pantalla coloreada delante del objetivo (pues así se aumentaría el tiempo de exposición).

Al enfriarse, la emulsión se vuelve gelatina, y luego se la lava un cuarto de hora en agua corriente, para quitarle el nitrato de potasio formado en la reacción del nitrato de plata sobre el bromuro de potasio. Se refunde la emulsión para cubrir las placas.

Toma de la fotografía. — La superficie reflectora se obtiene pegando una capa de mercurio a la superficie sensible. El aparato más cómodo es el bastidor construido por Mackenstein (fig. 664). La parte anterior se abre mediante dos bisagras A A, y se coloca la placa P en un cuadro de piel de gamuza C, pegado en una lámina de hierro. Hay que colocar la placa con la cara sin gelatina del lado del objetivo, que es lo contrario de lo que se hace en la fotografía ordinaria. Se vuelve a cerrar el bastidor con los broches F; entonces la placa se apoya sobre la piel de gamuza por la presión de los resortes r r, y el espacio que queda detrás viene a ser como una cubeta muy plana. Una abertura O hecha en la parte inferior comunica por un tubo de caucho T con un depósito de hierro R, que contiene mercurio cerrado con llaves de hierro. Para que el mercurio pase a m detrás de la placa, se levanta el depósito y se abren las llaves. Concluida la exposición, se hace la operación contraria para

que el mercurio vuelva al depósito. El aparato tiene la forma de un bastidor negativo ordinario con ventana V.

Lippmann ha aplicado primero su método a la reproducción de los

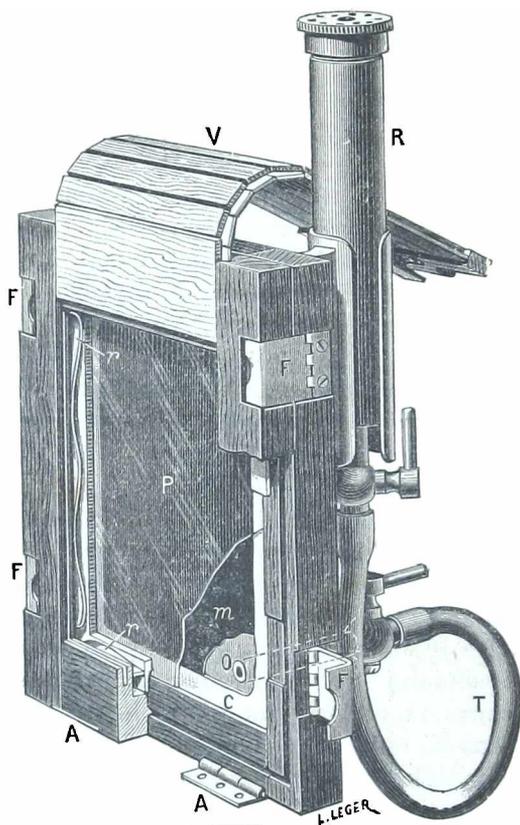


Fig. 661.

colores simples del espectro y después a los colores más complejos, obteniendo reproducciones de objetos diversos, cuadros, flores, paisajes, etc. Con buenas condiciones de luz, la exposición no pasa de algunos segundos.

Para revelar y fijar la imagen se procede del mismo modo que para la fotografía ordinaria. Una vez lavada y bien seca la placa, presenta los colores del objeto fotografiado cuando se recibe en el ojo la luz reflejada por la placa. Para eliminar las luces parásitas que lavan los colores y que provienen de transparencia de la placa y de la reflexión en la cara del vidrio no gelatinada, se ennegrece ésta y se pone en la cara gelatinada una lámina prismática de vidrio, interponiendo entre ambas una

capa de bálsamo del Canadá. Los colores quedan perfectamente fijos y no se alteran a la luz. Más adelante (671), estudiaremos la teoría de este notable procedimiento de fotografía de los colores.

661. Método indirecto. Procedimiento tricromo. — Supuesto un color simple o compuesto, se le puede reproducir, es decir obtener un tono que produzca el mismo efecto en el ojo, con la mezcla de *tres colores solamente*, rojo, amarillo y azul (o rojo, verde y azul), tomados en proporciones convenientes. Supongamos que se hayan hecho tres pruebas fotográficas transparentes de un mismo objeto: la primera, de color rojo, que contenga sólo las partes del objeto, cuyos tonos tengan ese color, siendo las intensidades de este color iguales en las partes correspondientes del objeto y su imagen; la segunda, de color amarillo y la tercera, de azul. La superposición de esas tres imágenes sobre un fondo blanco o una lámina de vidrio que se mira por transparencia deberá darnos la *impresión* del objeto coloreado.

Tal es el principio del procedimiento tricromo. Veamos cómo se le aplica prácticamente. Se obtiene un primer clisé interponiendo delante del objetivo una pantalla transparente *verde*, color complementario del rojo que se debe dar a la prueba correspondiente. La pantalla deja pasar todos los colores, menos el rojo. En una prueba fotográfica ordinaria, tirada con este clisé, las partes rojas del objeto aparecerían negras; pero se les da el tono rojo y así se obtiene la prueba roja. Para tener pruebas amarillas y

azules se toman dos negativos interponiendo sucesivamente dos pantallas, una *violado*, complementario del amarillo, y la otra, *anaranjado*, complementario del azul, y se tiran con esos dos clisés dos pruebas que se colorean respectivamente con amarillo y azul. Las placas empleadas deben ser : la primera de sensibilidad especial para el rojo; la segunda, una placa ordinaria. la tercera de sensibilidad especial para el anaranjado.

Para obtener las tres pruebas se puede tirar cada una en papel gelatinado impregnado de bicromato de potasio. Empleando en seguida agua caliente se disuelve la gelatina que no ha sido impresionada por la luz; así queda un relieve de gelatina insoluble que se colorea en un baño adecuado. Empleando procedimientos especiales se puede entonces trasladar los tres *monóchromos* a una misma hoja de papel blanco o a un vidrio.

El procedimiento de la fotocolorografía se presta también a la aplicación. Se impresiona una lámina de gelatina bicromatada debajo de cada clisé; después se tira sucesivamente con los colores correspondientes, rojo, amarillo y azul. En seguida se tira la prueba en tres veces, sobreponiendo las impresiones de las tres láminas. Son tantas las dificultades que entraña este procedimiento, que, al principio, creíase imposible realizarlo; pero se ha podido vencer perfectamente aquéllas.

El procedimiento tricromo úsase actualmente para tiradas de grabados en colores.

Proyecciones y cinematografía en colores. — Para conseguir la proyección de las imágenes en colores, se hacen primero tres clisés, como queda dicho, y con los tres se tiran tres positivos en vidrio. En lugar de colorear cada positivo, se proyectan intercalando en el paso de la luz una pantalla coloreada que sólo deje pasar el color conveniente. Hay que emplear tres linternas de proyección que sobrepongan exactamente las tres imágenes monocromáticas en la pantalla. De modo que es una aplicación directa del procedimiento tricromo, en el que se reemplazan simplemente los colores pigmentarios por los obtenidos filtrando la luz blanca a través de las pantallas convenientes.

Este procedimiento presenta grandes dificultades para las proyecciones cinematográficas. Así es que se han imaginado dos soluciones más sencillas, que han dado buen resultado.

En el *aparato Gaumont* se toma la vista cinematográfica con un aparato que tiene tres objetivos sobrepuestos, provisto cada uno de la conveniente pantalla coloreada. La película pancromática recibe tres imágenes distintas de 12 milímetros de alto cada una, ocupando una altura total de 38 milímetros. A cada obturación, el mecanismo hace bajar la banda 38 milímetros, para tomar otra serie, y así sucesivamente. De este modo se obtiene el negativo, con el cual se tira el *film* positivo. Para la proyección, el mismo aparato (u otro de proyección especial) da por estos tres objetivos tres imágenes sobrepuestas en la pantalla, y coloreadas por pantallas fijas interpuestas delante de los objetivos; la operación es la misma que en un cinematógrafo ordinario.

En el *Kinematicolor* se emplea una solución más sencilla. Se disminuye el largo total del grupo de imágenes, pero dejándoles el ancho que tienen en el *film* ordinario (18 mm.), y reduciendo el número de imágenes a dos : una roja y la otra verde. Con colores compuestos se puede tener así una reproducción bastante fiel de casi todos los colores. A más de esto, sólo se emplea un objetivo. Para tomar vistas, el mecanismo funciona como el de un cinematógrafo ordinario; pero, detrás del obturador ordinario, hay otro que tiene las dos pantallas coloreadas, que giran dos veces menos de prisa, con lo cual aparecen sucesivamente en la película las imágenes correspondientes a los dos monocromos. La proyección se verifica del mismo modo : se ve que las dos imágenes monocromos no están sobrepuestas al mismo tiempo, sino sucesivamente. Pero por la persistencia de las impresiones en la retina, se reproducen los colores para la vista. Sin embargo la reproducción no sería perfecta para los colores que contienen mucho azul. Este inconveniente se remedia reemplazando en el obturador la parte opaca por un vidrio azul-violado poco transparente para que no se perciba el cambio de imagen. Así da al fondo de la pantalla un tono general que corrige la falta de azul de los monocromos.

Procedimiento tricromo por medio de una sola placa. — *Placas autocromas Lumière.* — Muy recientemente se ha hallado un procedimiento que permite la fotografía de los colores *por medio de una sola placa y de una sola exposición* (placas autocromas Lumière, placas Jougla). He aquí el principio de este procedimiento que ha entrado ya en la práctica y que da notables resultados.

En un placa de cristal, prepárase una capa compuesta de elementos microscópicos transparentes, yuxtapuestos y coloreados, unos de rojo anaranjado, otros de verde y otros de violado. Si los colores están bien combinados y si el número de pantallas de cada clase es adecuado, la placa, al trasluz, parece incolora. En las placas Lumière, las pan-

tallas coloreadas se fabrican con granos de fécula coloreados, mezclados y esparcidos uniformemente por el cristal.

Encima de esta capa coloreada se encuentra la emulsión sensible *pancromática*, esto es, sensible a todos los colores.

Muchas y grandes han sido las dificultades con que se ha tropezado en la fabricación de estas placas; pero todas se han salvado con éxito. En efecto, es preciso que la capa de pantallas coloradas microscópicas se adhiera a su soporte, que sea muy tenue y que la coloración de los elementos que la componen esté completamente determinada, en cuanto a la intensidad, a la calidad de su color y al número de elementos de cada especie. Es necesario que sus colores sean estables, que no se difundan y que no haya superposición de pantallas coloreadas ni separaciones importantes entre ellas. En fin, la capa debe cubrirse con un barniz que tenga el índice de refracción de la fécula. Es menester que la preparación fotográfica quede ortocromatizada de modo que no falsee los colores.

Para la preparación de las pantallas coloreadas, se separan granos de 15 a 20 milésimas de milímetro de diámetro, en la fécula de patata, por medio de aparatos especiales. Estos granos se dividen en tres partes que se coloran respectivamente de rojo anaranjado, de verde y violeta. Los polvos coloreados obtenidos de este modo se mezclan, después de bien secos, en tal proporción que la mezcla no ofrezca color residuo. Con determinadas precauciones se consigue tener una sola capa de granos que se tocan todos, sin ninguna superposición.

Además, por medio de una máquina especial, trituranse estos granos, de manera que se vuelvan poligonales y contiguos por sus bordes. En esta forma, se ha constituido pantallas en las que cada milímetro cuadrado de superficie contiene ocho o nueve mil pantallitas coloreadas. La superficie queda, después, aislada por el barniz especial, y recubierta de la capa de emulsión pancromática.

Manipulación y teoría. — Se impresiona la capa en la cámara oscura volviendo la cara de cristal hacia el objetivo, a fin de que la luz atraviese las pantallas coloreadas antes de impresionar al bromuro de plata. Se debe interponer delante del objetivo una pantalla coloreada que atenúe los rayos azules y violados, para que el ortocromatismo sea más exacto.

Para comprender el efecto obtenido, imaginemos una porción de la imagen coloreada de verde; esta luz atravesará los elementos verdes de la capa; pero quedará interceptada por los elementos anaranjado y violado. Después de la revelación, como la plata se deposita en forma de capa opaca sobre los elementos verdes que han dado paso a la luz, las pantallas anaranjado y violado son las que no se cubrirán con una pantalla opaca, y, al trasluz, la región considerada de la imagen parecerá de color rojo, complementario del color fotografiado y debido a la superposición de los rayos anaranjados y violados. Lo mismo ocurre con los demás colores.

Se obtendrá, pues, una especie de negativa, en la cual los colores reales del sujeto fotografiado estarán sustituidos por los colores complementarios.

Los verdaderos colores se obtienen *invirtiendo la imagen*. Para esto, no se fija la imagen después de la revelación y, por medio de un baño que contenga permanganato de potasio y ácido sulfúrico, se disuelve la plata depositada por el revelador. Luego, procédesse a una nueva revelación, a plena luz, lo cual deposita plata en las partes en que el bromuro permanecía antes inalterable. Merced a esta operación, las partes de la placa que habían quedado intransparentes, después de la primera revelación, se vuelven opacas y viceversa. Se ve, fácilmente, que los colores del objeto fotografiado se reproducen en la imagen.

ACCIONES QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE LAS RADIACIONES

662. Acciones químicas de las radiaciones. — La mayor parte de las radiaciones del espectro son capaces de efectuar, o por lo menos favorecer, ciertas reacciones químicas. La combinación del cloro y del hidrógeno bajo la influencia de la luz solar, la acción de la luz sobre las sales de plata que se utilizan en fotografía, son ejemplos ya viejos de las propiedades químicas de las radiaciones.

La actividad de una radiación química determinada es, generalmente,

tanto más grande cuanto más pequeña es la longitud de onda de esta radiación : las radiaciones violadas y sobre todo las ultra-violadas son las que ejercen las acciones más enérgicas; por eso se les da el nombre de *rayos químicos*. Pero esta denominación no quiere decir que estos rayos tienen únicamente el poder de producir reacciones químicas, sino que indica solamente su actividad especial.

Acciones químicas de los rayos ultravioletados. — El estudio sistemático de las acciones químicas que ejercen los rayos ultravioletados, no se ha llevado a cabo sino después del invento de la *lámpara eléctrica de vapor de mercurio* (1007), que constituye un foco sumamente intenso de rayos ultravioletados, cuando se la construye con una *ampolla de cuarzo*, toda vez que el vidrio absorbe mucho los ultravioletados.

Antes de los últimos trabajos de Berthelot y de Gauduchon, sólo se había estudiado la acción de los rayos ultravioletados en ciertos casos particulares (acciones fotográficas, formación o descomposición de diversos cuerpos : ozono, agua oxigenada, persulfatos y percarbonatos, etc.). Los trabajos de Berthelot y de Gauduchon han demostrado que esta acción es mucho más importante de lo que se pensaba, y que ella es comparable, como generalidad, a la de la luz o de la electricidad. Los rayos ultravioletados producen, desde la temperatura ordinaria, una multitud de reacciones totales que el calor no realiza sino a elevada temperatura : luego desempeñan una función análoga a los catalisores. Sus acciones son enteramente semejantes a las de los tejidos vivos.

Reversibilidad de las acciones fotoquímicas. — *Síntesis de los hidratos de carbono.* — Los rayos ultravioletados efectúan reacciones reversibles, que conducen, en vaso cerrado, a un equilibrio entre dos reacciones inversas. Así, descomponen el agua en hidrógeno y oxígeno, pero son capaces a la vez de combinar el hidrógeno y el oxígeno; descomponen el anhídrido carbónico CO_2 para dar óxido de carbono CO y oxígeno O : pero pueden combinar CO y O para dar CO_2 ; combinan CO y H_2O para dar el aldehído fórmico H-CHO , y pueden descomponer a éste; en fin, polimerizan este aldehído en trioximetileno, y pueden también despolimerizarlo.

Los ejemplos precedentes tienen grandísima importancia ; porque esta serie de reacciones parecen ser las que realizan las plantas verdes en el fenómeno de la asimilación clorofílica. Hay que añadir que los físicos citados, sometiendo a la acción de los rayos ultravioletados una mezcla de amoníaco y de óxido de carbono, obtuvieron el amido fórmico, origen de la síntesis de las sustancias albuminoides que constituyen los más simples de los seres vivos.

Fotólisis. — La fotólisis es la descomposición de los cuerpos por las radiaciones. Las efectuadas con los ultravioletados son numerosas : descomposición del agua, del amoníaco, de los alcoholes, aldehídos, ácidos, cetonas, azúcares, etc. Las descomposiciones de los cuerpos orgánicos se parecen en cierto modo a las que producen las fermentaciones, con la cual queda probado el poder catalítico de las radiaciones ultravioletadas.

Acciones de polimerización. — Los rayos ultravioletados tienen mucho

poder polimerizante; pues se obtienen en seguida grados de condensación muy elevados. Así, el acetileno no da bencina, sino un polímero sólido.

Oxidaciones. — Los rayos ultraviolados producen verdaderas combustiones en frío en presencia del oxígeno: el hidrógeno se quema; el amoníaco se transforma en agua y nitrógeno; muchas sustancias orgánicas se transforman enteramente en anhídrido carbónico y agua.

663. Acciones de las radiaciones sobre los seres vivos. — Fototerapia. — Poder bactericida de los rayos ultraviolados. — Las radiaciones ejercen acciones diversas sobre los seres vivos. Conocido es desde hace tiempo el efecto de la luz en el crecimiento de los vegetales (fototropismo) y en el desarrollo de la clorofila en sus tejidos. Las acciones de los rayos ultraviolados son especialmente enérgicas, como se desprende de sus acciones químicas. Hablando en general, los ultraviolados destruyen la materia viva: matan los hongos y los microbios, así como sus esporos; de ahí proviene el poder bactericida de la luz solar; la epidermis humana, expuesta, aunque sea breve tiempo, a los rayos ultraviolados, presenta pocas horas después los síntomas característicos de la *insolación*, y ocasionan en los ojos graves conjuntivitis.

Fototerapia. — También se utiliza la acción de las radiaciones en el tratamiento de ciertas enfermedades. La luz roja se ha empleado con buen resultado en el tratamiento del sarampión y la viruela, pues suprime la supuración y la fiebre supurativa de la viruela.

Los rayos *violados* y *ultraviolados* han dado evidentes resultados en el tratamiento de las enfermedades cutáneas, como el *lupus vulgar* (tratamiento de Finsen). Para esto se usan reflectores que concentren en las superficies que hay que corregir, bien los rayos solares, bien los de un arco eléctrico (baños de luz).

Esterilización por los rayos ultraviolados. — Los rayos solares tienen una acción bactericida poco enérgica, porque los ultraviolados contenidos en la irradiación del sol los absorbe en gran parte la atmósfera terrestre. Pero las radiaciones que emite una lámpara de vapor de mercurio, con ampolla de cuarzo, producen efectos muy intensos. Courmont y Nogier fueron los primeros que descubrieron que estas radiaciones pueden esterilizar completamente el agua cargada de microbios, y hacerla potable. Su descubrimiento quedó después confirmado por los experimentos de Miquel, Cernovodeau y Henri. Ya se han aplicado muchos aparatos para la esterilización de las aguas del consumo público, y su principio consiste en hacer circular el agua en pequeña cantidad muy cerca de la lámpara de vapor de mercurio; esto es necesario, porque un espesor de agua de algunos centímetros absorbe los rayos ultraviolados.

Estos rayos pueden esterilizar también otros líquidos alimenticios, tal como la leche, sin alterarlos.

CAPÍTULO XI

VIBRACIONES LUMINOSAS

661. **Diversas hipótesis que explican los fenómenos luminosos.** — Para explicar los fenómenos luminosos se han sostenido varias hipótesis. Las más célebres son la teoría de la emisión y la de las ondulaciones.

En la teoría de la emisión supónese que los cuerpos luminosos emiten partículas que se mueven con la velocidad de la luz y que atacan a los cuerpos iluminados. Esta teoría debe abandonarse. En efecto, para explicar el hecho de que al refractarse un rayo luminoso que pasa del aire al agua se acerca a la normal, hay que suponer, en la teoría de la emisión, que la velocidad de la luz es mayor en el agua que en el aire. Y experimentos directos efectuados por Foucault han demostrado que la velocidad de la luz es menor en el agua que en el aire.

La teoría de las ondulaciones supone que las moléculas de los cuerpos luminosos se hallan en un estado vibratorio extremadamente rápido y que estas vibraciones crean ondas que se propagan en un medio llamado *éter*. Este medio llena el vacío y los intervalos moleculares de los cuerpos transparentes. Las ondas luminosas producidas de este modo se reflejan y refractan en las superficies de separación de los diversos medios. Ya hemos visto (420, 428, 430), el mecanismo por el cual se efectúan la propagación, la reflexión y la refracción de las ondas. En cuanto a lo que concierne a la refracción, hemos visto que la relación constante $\frac{\text{sen. } i}{\text{sen. } r} = n$ que, en la luz, es el índice de refracción del segundo medio con respecto al primero, es igual a la relación $\frac{V}{V'}$ de las velocidades de las ondas en ambos medios.

En particular, en el paso de la luz del aire al agua. $n > 1$; de donde se deduce que V' debe ser inferior a V . La teoría de las ondulaciones está, pues, de acuerdo con los experimentos de Foucault. Pero, para establecer esta teoría se necesitan otras pruebas. Las hallaremos en los fenómenos de interferencia de la luz.

OBSERVACIONES. — 1º En la teoría de las ondas, pueden traducirse fácilmente todos los resultados que hemos encontrado en óptica geométrica. Debe tenerse en cuenta que los rayos no tienen existencia objetiva y que son simplemente las direcciones en que se propagan las ondas. Los rayos que divergen de un punto o que hacia él convergen representan las direcciones de propagación de las ondas esféricas cuyo centro es este punto. Los rayos paralelos corresponden a ondas planas. En acústica (427, 429) hemos examinado ya algunos casos. Fácilmente pueden aplicarse los mismos principios a todos los casos.

2º Todas las fórmulas relativas a las elongaciones, velocidades vibratorias, propagación de las ondas que hemos establecido en el estudio general de las vibraciones, se aplican a las vibraciones luminosas sin más modificaciones que los valores numéricos de las constantes que contienen.

665. **Interferencia de la luz.** — **Ondas estacionarias.** — **Longitudes de onda de las radiaciones.** — Se puede tratar de realizar, para la luz, ondas estacionarias, como las que hemos visto en el estudio de las vibraciones (432). Para conseguirlo, puede emplearse el mecanismo de la fotografía de los colores de Lippmann. Proyéctase, por ejemplo, un espectro, en una placa fotográfica de emulsión transparente recostada contra un espejo de mercurio* y se revela la placa. Si después de revelada y seca, se corta la emulsión con el micrótopo, en secciones delgadas perpendiculares al plano de la placa y se examinan en el microscopio estas secciones, se ve en ellas rayas negras paralelas y equidistantes, formadas por plata reducida. De donde se deduce que, en la emulsión, la plata reducida formaba hojas paralelas al espejo. Ahí se reconoce un sistema de planos nodales y planos ventrales, debidos a la interferencia de las ondas incidentes y reflejadas. La distancia de dos hojuelas consecutivas debe ser igual a una semilongitud de onda del movimiento vibratorio.

* Este mecanismo destinado a indicar las ondas estacionarias luminosas fué empleado, antes que por Lippmann, por Wiener; pero en forma algo diferente.

Si, por otra parte, se examinan sucesivamente las regiones de la placa que corresponden a las diversas radiaciones del espectro, se verá que las hojas de plata están más apretadas en el violado que en el rojo. Deducimos, pues, que la longitud de onda del violado es menor que la del rojo.

Este experimento no da una medida exacta de las longitudes de onda de las diversas radiaciones; sin embargo, enseña que estas longitudes de onda se aproximan a una semi-millonésima de milímetro.

Experimentos fundados en otros métodos permiten medir estas longitudes de onda. He aquí algunos resultados referentes a la propagación de las ondas luminosas en el aire :

Rojo extremo	0 μ ,8
Amarillo	0 μ ,55
Violado extremo	0 μ ,4

Además, los mismos fenómenos que sirven para medir las longitudes de onda de las radiaciones visibles pueden aplicarse también a las infra-rojas y ultra-violadas.

Se ve que las longitudes de onda de las radiaciones infra-rojas son mayores que las de los rayos rojos : varían, en las radiaciones conocidas, entre 0 μ ,8 y 314 μ . Las de las radiaciones ultra-violadas son más pequeñas que las de las radiaciones violadas; se conocen las radiaciones ultra-violadas cuyas longitudes de onda varían entre 0 μ y 0 μ ,1.

666. **Periodo de las vibraciones luminosas.** — Sea T la frecuencia del movimiento vibratorio de una radiación y V, su velocidad de propagación. La longitud de onda λ está determinada por la fórmula

$$\lambda = VT, \quad \text{de donde} \quad T = \frac{\lambda}{V}.$$

Si sustituimos a V por 300 000 kilómetros, o sea, 3×10^{10} centímetros, y a λ por las longitudes de onda de las radiaciones del espectro visible, expresadas en centímetros, tendremos :

En el rojo :

$$\text{Para el violado :} \quad T_r = \frac{8 \times 10^{-5}}{3 \times 10^{10}} = \frac{1}{375} \cdot 10^{12}.$$

$$T_v = \frac{4 \times 10^{-5}}{3 \times 10^{10}} = \frac{1}{750} \cdot 10^{12}.$$

Se ve que el periodo del rojo extremo es 375 billones de vibraciones por segundo y que, en el violado, es dos veces menor.

Las radiaciones distingúense, pues, unas de otras, por la frecuencia del movimiento vibratorio que las constituye. Las más lentas son las infra-rojas; luego vienen las radiaciones visibles; después, las ultra-violadas, que son las más rápidas. También se ve que las radiaciones luminosas no comprenden sino un intervalo de vibraciones muy restringido. Si se comparan las vibraciones luminosas con las sonoras, puede decirse que la luz es el sonido del éter; pero que las diversas radiaciones visibles apenas comprenden una octava.

667. **Interferencia de los movimientos vibratorios que emanan de dos procedencias sincronas.** — Los fenómenos de interferencia que vamos a estudiar se fundan en el principio siguiente.

Supongamos que en dos puntos OO' (fig. 665), se hallan dos centros de vibraciones sincronas y de igual fase, rodeados de un medio en que se propagan las vibraciones.

Supongamos que O y O' están muy próximos: las vibraciones que envían a un punto M algo distante, pueden ser consideradas como producidas en la misma dirección, bien sean transversales o longitudinales.

Consideremos un punto cualquiera A del plano perpendicular en el centro de OO'. Este punto se hallará a igual distancia de los dos centros O y O'. En consecuencia, los movimientos vibratorios, concordantes de O y O', después de recorrer las distancias iguales OA y O'A, llegarán, concordantes aún, al punto A, y sus velocidades vibratorias, así como sus elongaciones se añadirán a ellos. Pero, si se considera un punto M, tal que la diferencia de las distancias OM-O'M (o *diferencia de marcha*), sea igual a una semlongitud de onda $\frac{\lambda}{2}$ de las oscilaciones, los movimientos, que salen concordantes de O y de

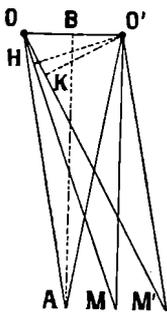


Fig. 665.

O', llegarán a M en oposición de fase. Por lo tanto, *sus velocidades vibratorias disminuirán y se anularán mutuamente*. El conjunto de los puntos tales como M es el lugar geométrico de los puntos para los cuales $OM - O'M = \frac{\lambda}{2}$; luego es la superficie de un hiperboloide de revolución alrededor de OO' cuyos focos son O y O' y cuyo eje mayor es $\frac{\lambda}{2}$.

Si consideramos un punto M', tal que tengamos $OM' - O'M = \lambda$, habrá, otra vez, en este punto, adición de velocidades y elongaciones; porque los movimientos que salieron concordantes de O y O', continúan siendo concordantes al llegar a M'. El lugar geométrico de los puntos tales como M' es un nuevo hiperboloide cuyos focos son O y O'.

Se ve fácilmente que para todos los puntos en que la diferencia de la marcha sea igual a un número impar de semilongitudes de onda, los movimientos vibratorios se anulan. Se suman, al contrario, en los puntos en que la diferencia de marcha es un número entero de longitudes de onda.

Puede indicarse este fenómeno de interferencias, fijando en un diapasón dispuesto como indica la figura 666, una varilla provista de dos puntas verticales O y O' que llegan a la superficie del mercurio contenido en un cubo. Al vibrar el diapasón, producen, en la superficie del liquido, arrugas de forma hiperbólica, que constituyen ondas estacionarias.

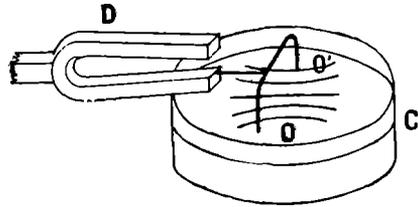


Fig. 666.

668. Aplicación a los fenómenos luminosos. — I. Espejos de Fresnel. — Supongamos que O y O' sean dos centros de vibraciones luminosas monocromáticas y perfectamente sincronas. Para realizar esto, no es posible tomar dos focos luminosos independientes. En efecto, no se sabe cuál es la constitución de estos focos. Los puntos luminosos que los constituyen se suceden unos a otros y sería imposible conseguir en todo momento la misma fase vibratoria en O y O'. Además, como vamos a ver, es preciso que la distancia entre los focos O y O' sea muy pequeña. Realizanse las condiciones exigidas, desdoblado, en cierto modo, un mismo foco luminoso, lo cual se consigue por diversos procedimientos, de entre los cuales, citaremos, en primer término, el aparato de los espejos de Fresnel.

Compónese de dos espejos planos M y M' (fig. 667) de cristal ahumado (por conservar sólo la luz reflejada en la primera cara), que forman entre sí un ángulo muy obtuso. Supongamos en S un punto luminoso que emita luz monocromática. Los haces de rayos que dirige a los dos espejos divergen de ellos como si procediesen respectivamente de los puntos O y O', simétricos de S con relación a los espejos. Estos haces tienen una parte común señalada con rayas en la figura. Para todos los puntos de esta parte común, O y O' funcionan como dos focos vibratorios perfectamente sincronos, que tienen, en todo momento, la misma fase. Por lo tanto, en este espacio, debe producirse el fenómeno de interferencia que acabamos de estudiar. Observemos dicho espacio con una lente, cuyo eje esté dirigido según AB, por ejemplo, y que permitirá ver claramente en un plano PQ perpendicular a AB. Obsérvase, en el campo de la lente, bandas paralelas alternativamente brillantes y oscuras que constituyen lo que se llama *franjas de interferencias*. He aquí la explicación de esta apariencia. En todos los puntos de intersección del plano PQ con el plano perpendicular en el centro de OO', hay un máximo de movimiento. Estos puntos forman una franja brillante que se llama *franja central*. Las dos franjas negras que están a uno y otro lado de la franja central son las intersecciones del plano PQ y del hiperbo-

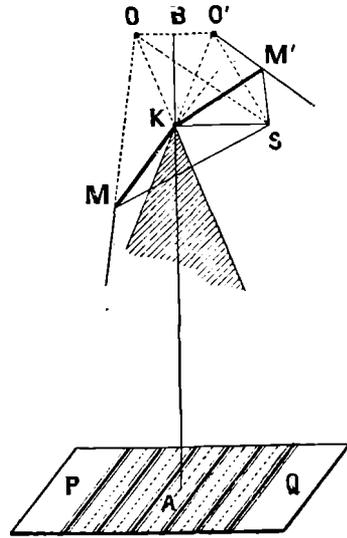


Fig. 667.

loide, lugar geométrico de los puntos para los cuales la diferencia de marcha es $\frac{\lambda}{2}$. Estas

dos franjas deberian ser arcos de hipérbola; pero, en el campo de la lente, parecen rectas, porque son poco combadas. dadas la pequeñez de OO' y la gran separación relativa de PQ . Las franjas brillantes que siguen, colocadas simétricamente con respecto a A , son las intersecciones de PQ con el hiperboloide que corresponde a la diferencia de marcha λ , y así sucesivamente.

Este experimento demuestra bien la naturaleza oscilatoria de la luz.

Obtiénese un fenómeno más brillante colocando en S , en vez de un punto luminoso, una hendidura estrecha, paralela a la intersección de los dos espejos. Cada punto de la

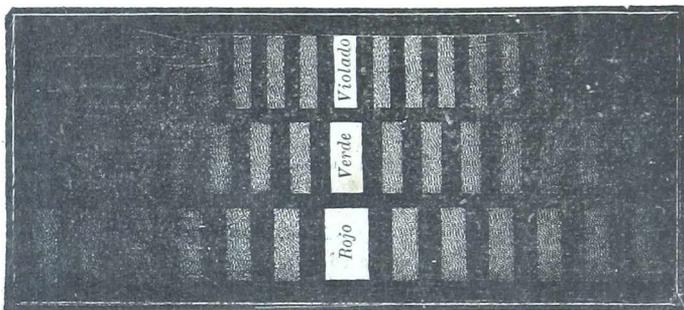


Fig. 668.

hendidura da lugar a un sistema de franjas; pero estos sistemas se superponen y la intensidad del fenómeno aumenta notablemente.

OBSERVACIÓN. — La separación de las franjas es evidentemente tanto mayor cuanto menor es la distancia de los focos O y O' y mayor la distancia de los espejos a la pantalla PQ . En efecto, en estas condiciones, es menester separarse más del punto A , en PQ , para que la diferencia de marcha sea igual a una semilongitud de onda, es decir para que se encuentre la primera franja negra.

Por otra parte, sabemos que las longitudes de ondas luminosas son sumamente pequeñas. Por consiguiente, para que las franjas estén lo bastante espaciadas para verlas claramente, será preciso que la distancia OO' sea muy pequeña. Los espejos deben formar entre sí un ángulo muy aproximado a 180° .

Franjas en los diversos colores. — Según lo que precede, las franjas estarán tanto más separadas cuanto mayor sea la longitud de onda de la radiación simple que emite el foco S . Se observa que, si se ilumina la hendidura S con las diversas radiaciones del espectro, las franjas están más separadas en el rojo que en el violetado (fig. 668).

Esto se debe a que la longitud de onda del rojo es mayor que la del violetado.

Franjas en luz blanca. — Cuando se emplea la luz blanca, las franjas del mismo orden (es decir, que corresponden a la misma diferencia de marcha) en los diversos colores, se superponen tapándose de manera imperfecta: luego su conjunto debe de formar una especie de espectro confuso, que se reduce a una banda más o menos irisada en los bordes y en el cual los colores se hallan colocados en orden inverso al que guardan los del espectro solar con relación a la franja blanca central.

II. Experimento de Young. — Con la punta de una aguja, practicanse en una hoja de papel negro, dos agujeros finísimos y muy próximos O y O' (fig. 669). Acercando la hoja a la vista, se mira a través de los agujeros, un foco luminoso muy distante y muy pequeño, tal como un arco voltaico, y se ven anillos alternativamente brillantes y oscuros, surcados por franjas de interferencia.

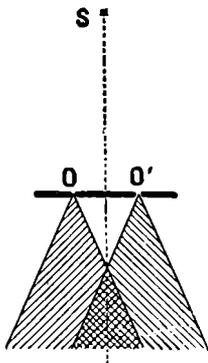


Fig. 669.

Estos anillos se deben a un fenómeno de difracción (672) que se explica del modo siguiente. La luz, procedente de S , al atravesar las aberturas O y O' se esparce por causa de la difracción, en dos haces que tienen una parte común y en donde las vibraciones producen interferencia. Como se ve, este experimento es más complicado que el de los espejos de Fresnel.

INTERFERENCIAS PRODUCIDAS POR LAS LÁMINAS DELGADAS

669. Coloración de las láminas delgadas. — Interferencias producidas por una lámina de aire. — Anillos de Newton. — Si se examina una película muy delgada de una sustancia, reflejando en ella luz blanca, se la ve irisada con vivos colores. En este caso se encuentran las pompas de jabón, las películas de óxido de plomo que se forman en la superficie de este metal al fundirlo en contacto con el aire, etc. Si se examinan estas películas con luz monocromática, como la de un mochoero Bunsen en el que se haya puesto cloruro de sodio, se las ve surcadas por franjas alternativamente brillantes y oscuras.

Estos fenómenos se deben a las interferencias luminosas que se reflejan en las dos caras de la lámina.

Expondremos primero la teoría, suponiendo que la lámina delgada es una lámina de aire colocada, por ejemplo, entre dos láminas de cristal de gran espesor con relación al de aquélla.

Imaginemos un rayo SI (fig. 670) procedente de un foco de luz monocromática y que incida en la lámina. Parte de la luz se refleja en I, en la primera cara de la lámina y sale según R. Otra porción de luz penetra en la lámina y se refleja, en parte, en la segunda cara, en I', saliendo por R'. Sólo consideraremos estos dos rayos, aunque hay otros muchos, de intensidades rápidamente decrecientes que sufren 2, 3, 4... reflexiones internas y que vuelven por cima de la lámina. Si se coloca el ojo en O, y recibe los rayos RR', estos rayos paralelos se reunirán en un punto de la retina; pero, como, a partir de I, recorren caminos diferentes, llegan a la retina con mayor o menor diferencia de fase. Los movimientos podrán, pues, sumarse o destruirse. Notemos que, si la lámina es muy delgada, el ojo O ve los puntos I, I', I'' en el mismo lugar de la lámina; si se suman las vibraciones que recibe ve luminoso este sitio; si se destruyen, lo ve oscuro.

Las franjas de interferencia que parecen verse en la lámina son motivadas por estos fenómenos. No son sino apariencias, porque, en realidad, no existen más que en la imagen de la lámina que se forma en la retina. Además, si cambia la inclinación de los rayos, el fenómeno cambia también porque varía la diferencia de marcha de los rayos que inciden en el ojo. De este modo, una región de la lámina que parecía oscura puede parecer luminosa y viceversa.

Nos limitaremos al caso en que los rayos inciden perpendicularmente en la lámina, lo cual puede realizarse fácilmente iluminando la lámina L (fig. 671) con la luz del foco S, reflejada por medio de un espejo sin azogar G, a 45° de L. Entonces, se observan los rayos reflejados a través del espejo G.

En este caso, la diferencia de marcha de los rayos que producen la interferencia es evidentemente el duplo del grueso de la lámina.

Se observa, de este modo, el fenómeno siguiente :

Los puntos en que se tocan las dos placas de cristal que encierran la lámina de aire parecen negros. Este fenómeno, que puede sorprender a primera vista, ya que en los puntos considerados la diferencia de marcha de los rayos R y R' es nula, se explica por la hipótesis siguiente. Se supone que reflejándose en I' (fig. 670) aire al cristal, es decir, de un medio a otro más refringente, las elongaciones del movimiento vibratorio cambian de signo, como sucede cuando se refleja una sacudida en el extremo fijo de una cuerda (426). Al contrario, en el punto I, en que la reflexión se hace del cristal al aire, se supone que no hay cambio de signo, lo mismo que cuando se refleja una sacudida en el extremo libre de una cuerda. También podemos decir que toda reflexión que se produce de un medio a otro más refringente introduce una diferencia de marcha de una semilongitud de onda.

Todas las regiones de la lámina de aire cuyo espesor sea $\frac{\lambda}{4}$ parecerán brillantes, porque la diferencia de marcha será $2 \frac{\lambda}{4}$, o $\frac{\lambda}{2}$, a la cual hay que añadir la diferencia de

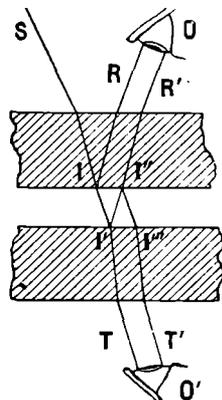


Fig. 670.

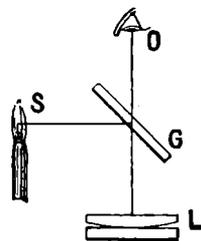


Fig. 671.

marcha $\frac{\lambda}{2}$, debida a la reflexión del aire en el cristal. Por lo tanto, so puede decir que la diferencia de marcha en estos puntos es λ .

Del mismo modo, todos los puntos en que el espesor sea $\frac{\lambda}{2}$, es decir, en los cuales la diferencia de marcha total sea $2 \times \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{2} = \frac{3\lambda}{2}$, aparecerán oscuros.

En general, todos los puntos para los cuales el espesor sea $p \frac{\lambda}{2}$ (siendo $p = 0$ o un número entero cualquiera) aparecerán oscuros.

Por el contrario, todos los puntos para los cuales el espesor sea $(2q + 1) \frac{\lambda}{4}$ (siendo q igual a 0 o un número entero cualquiera) aparecerán brillantes.

Se ve, pues, que sean oscuras o brillantes, las franjas son los lugares geométricos de los puntos en que la lámina de aire tiene el mismo espesor.

CONSECUENCIAS. — 1ª Si las placas de cristal fuesen perfectamente planas y paralelas, la luz parecería tener la misma intensidad en todos los puntos. Esto no se puede realizar exactamente. La observación de las franjas indica las desigualdades de espesor de la lámina de aire y permite, por tanto, reconocer los defectos de planetismo de las placas de vidrio.



Fig. 672.

2ª Si las láminas fuesen planas; pero que formasen un ángulo pequeño, las franjas serían rectilíneas, puesto que los lugares geométricos de igual espesor de la lámina de aire serían, en este caso, rectas paralelas.

3ª Anillos de Newton. — En el mecanismo que engendra las franjas conocidas con el nombre de anillos de Newton, se coloca, en una lámina

plana de cristal, una lente plana convexa de curvatura muy pequeña (fig. 672.1). Los lugares geométricos de los puntos de igual espesor son, entonces, circunferencias; de este modo, si se coloca el sistema en L (fig. 671) se observa una serie de anillos alternativamente brillantes y oscuros (fig. 672, II); el centro, en que se tocan la lente y el plano, aparece negro.

En este mecanismo, se sabe cómo varía el espesor en un punto de la lámina de aire en función de la distancia de este punto al centro del fenómeno. Así, puede comprobarse experimentalmente que los anillos brillantes y oscuros están bien colocados en los puntos que indica la teoría precedente.

4ª Franjas en los diversos colores. — Como la longitud de onda varía cuando se pasa de una radiación a otra, si se ilumina una lámina delgada sucesivamente con radiaciones diferentes, las franjas no ocuparán el mismo lugar. Sobre todo, en el mecanismo de Newton, los anillos de luz violada estarán más apretados que los de luz roja. En efecto, para que el espesor de la lámina sea igual a $\frac{\lambda v}{4}$ (λv longitud de onda del violado) hay que separarse menos del centro que para que sea $\frac{\lambda r}{4}$ (λr longitud de onda del rojo); puesto que λv es menor que λr .

5ª Franjas en luz blanca. — Con la luz blanca, no se superponen los anillos de diversos colores, sino que paracen irisados.

Franjas producidas por la luz transmitida. — Cuando la luz incide en una lámina delgada de aire, parte de ella la atraviesa.

Sea SII' un rayo incidente (fig. 670).

En I', parte de la luz sale de la lámina de aire y da lugar a un rayo transmitido T. Otra parte refléjase en I', luego, en I'', y una porción de su luz sale por I'''T'. No tendremos en cuenta los rayos producidos por otras reflexiones internas. El ojo, aplicado a O' recibirá dos rayos que, en general, tendrán diferencia de marcha. De ahí resulta un fenómeno de interferencia.

Cuando se observa de este modo un sistema de anillos de Newton, por transparencia, se ve anillos alternativamente brillantes y oscuros; pero mucho más pálidos que los anillos producidos por la reflexión de la luz. Además, tienen centro luminoso. En efecto, de los dos rayos interferentes, uno, SII'T no sufre ninguna reflexión; pero el otro, SII'I''T', sufre dos reflexiones pasando del aire al cristal. En cada reflexión, la elongación cambia de signo y, por consiguiente, todo sucede como si no existiera tal cambio de signo. La

diferencia de fase de los rayos es nula para los puntos en que es nulo el espesor de la lámina de aire. Por tanto, estos puntos deben aparecer brillantes.

670. **Láminas delgadas de diversas sustancias.** — Sea cual fuere la naturaleza de la lámina delgada, se producen fenómenos del mismo orden. La figura 673 indica el caso de un rayo SI que incide en una lámina delgada, de agua de jabón, por ejemplo, y que da lugar, por una parte, a dos rayos reflejados RR' y, por otra, a dos rayos transmitidos TT'.

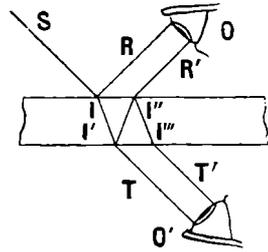


Fig. 673.

En luz monocromática, un ojo colocado en O ve el punto de la lámina a que mira, ya brillante, ya oscuro, según la diferencia de marcha de los rayos que recibe. En general, ve la lámina surcada por franjas alternativamente brillantes y oscuras, repartidas con arreglo a las variaciones de espesor de la lámina. En luz blanca, aparecen coloreadas tales franjas. Análogos fenómenos se producen con la luz transmitida; pero las franjas son más pálidas.

671. **Aplicaciones de las interferencias producidas por las láminas delgadas.** — 1º *Medida de las longitudes de onda.* — Supongamos que la lente de un sistema de anillos de Newton (fig. 670) esté fija. Movamos el plano de cristal por medio de un tornillo micrométrico de tambor graduado, que dé vueltas ante la marca, de manera que al girar el tornillo se aleje lentamente el plano, conservándolo paralelo a sí mismo. Iluminemos el sistema con una luz monocromática y observemos en la dirección normal. Si, al principio, están en contacto las dos superficies, se ve un sistema de anillos de centro negro. Pero, si se aleja el plano, cuando la distancia de las láminas aumente en $\frac{\lambda}{4}$, los anillos tendrán centro blanco. Y volverán a tener centro negro cuando el plano de la lente se haya alejado $\frac{\lambda}{2}$. Durante el movimiento, parece que los anillos entran en el centro. Para realizar una medida de longitud de onda se nota la posición inicial del plano de cristal y se mueve lentamente, contando el número n de anillos negros que entran en el centro. Conviene que n sea todo lo grande posible. Y se marca la posición final de la lámina. Sea l el cambio de lugar, medido con un tornillo micrométrico. Tendremos evidentemente :

$$l = n \frac{\lambda}{2}; \quad \text{de donde} \quad \lambda = \frac{2l}{n}.$$

2º *Medida de los movimientos pequeños.* — Para medir un pequeño cambio de lugar de dos piezas móviles, se fija a una de ellas la lente, y, a la otra, el plano de cristal de un sistema productor de anillos de Newton iluminado por luz monocromática. Todo cambio de lugar relativo quedará indicado por un movimiento de los anillos. Este procedimiento es sumamente sensible; puesto que basta un movimiento de un cuarto de longitud de onda ($0,25 \lambda$ para la luz amarilla) para que una franja brillante suceda a otra oscura y viceversa. Se pueden apreciar movimientos mucho más pequeños aún. En este principio, se funda el dilatómetro de Fizeau (247).

OBSERVACIÓN. — El sistema anterior, iluminado por la luz amarilla de sodio, sólo permite medir distancias muy pequeñas. Cuando la distancia de las superficies que limitan la lámina de aire se hace algo grande, desaparecen los anillos. Esto se debe a que la luz de sodio no es perfectamente monocromática. *Realizanse interferencias con gran diferencia de marcha* escogiendo focos de luz perfectamente monocromáticos. De este modo, Michelson, comparando el metro con las longitudes de onda y empleando la radiación roja de cadmio, produjo interferencias por medio de superficies colocadas a 10 centímetros una de otra. También se usan, con buen resultado, las diversas radiaciones del arco de mercurio (1007).

3º *Explicación de la fotografía de los colores por el método interferencial de Lippmann.*

— En las fotografías de Lippmann se produjeron hojas de plata distantes de $\frac{\lambda'}{2}$ en el punto en que la luz roja había atacado la placa. Si se hace reflejar luz blanca normalmente a la placa, los rayos reflejados por esas hojas tienen entre sí diferencias de marcha $\lambda r, 2\lambda r$. Por lo tanto, para la luz roja contenida en la luz blanca, se agregarán las elongaciones debidas a las reflexiones sucesivas, y la luz roja será reflejada con intensidad, mientras que serán apagadas las demás luces del espectro. Por lo contrario, un punto de la placa que haya recibido luz violada durante la exposición, reflejará con intensidad la luz violada, y lo mismo ocurrirá con los demás colores.

En cuanto al brillo de los colores observados en los espectros fotografiados por

Lippmann, se debe éste al considerable número de láminas delgadas superpuestas en cada región, y cuyos efectos se suman. En una capa de gelatina de 1/10 de milímetro de espesor, el rojo del espectro será producido por 330 laminitas superpuestas, el amarillo por 400 y el violado por 500.

DIFRACCIÓN DE LA LUZ

672. **Fenómenos de difracción.** — La propagación rectilínea de la luz falta en un gran número de circunstancias que constituyen los fenómenos de difracción. Producense principalmente cuando la luz encuentra pantallas o aberturas de dimensiones muy pequeñas.

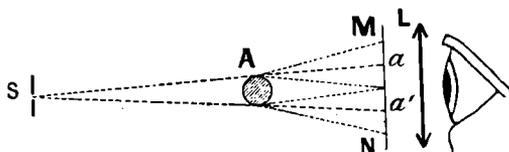


Fig. 674.

1º Iluminemos, por ejemplo, una aguja fina, representada en sección por A (fig. 674), con la luz que viene de un punto luminoso S* y examinemos con la lente la sombra de esta aguja en una pantalla MN**. En vez de ver la sombra aa' de la aguja conforme a la teoría geométrica, veremos una serie de franjas alternativamente brillantes y oscuras, en la sombra geométrica aa' y fuera del límite de esta sombra. En particular, en el centro de la sombra geométrica, hay una franja brillante.

Puede decirse que la luz cambia de dirección al encontrar la aguja, esto es que queda *difractada* por la aguja.

2º Igualmente, si se proyecta la sombra del filo de una navaja de afeitar, por medio de un punto luminoso, se la ve orillada de franjas que se extienden fuera de la sombra geométrica. Dentro de esta sombra, la luz se va degradando.

3º Si se reemplaza la aguja o la lámina de los experimentos anteriores, por una pantalla horadada por una hendidura delgada, en el plano MN, en vez de ver una simple banda luminosa, veremos una serie de franjas de difracción.

4º Mirando de la misma manera la imagen proyectada por una pequeña pantalla circular o por un pequeño orificio practicado en una pantalla, se ven franjas de difracción análogas a las precedentes, pero circulares.

Observación. — En los tres primeros experimentos, resulta más brillante el fenómeno reemplazando el orificio S por una hendidura paralela a la aguja, o al borde de la lámina, o a la hendidura cuyas imágenes se proyectan.

673. **Causa de los fenómenos de difracción.** — Hemos visto que cuando un movimiento vibratorio se propaga en un medio, todos los puntos de una superficie de onda determinada Σ (fig. 409) pueden considerarse como nuevos centros de vibración***.

Cuando las ondas emitidas por un centro S (fig. 409), se propagan sin estar limitadas, ya por pantallas, ya por aberturas, sabemos que, a causa de las interferencias de los movimientos que proceden de los diversos puntos de una superficie de onda Σ , el estado vibratorio que, en un momento dado, estaba en Σ , al cabo de un tiempo t , se hallará en una nueva superficie de onda Σ' que es una nueva superficie esférica de centro C. De ahí resulta que, en este caso, el fenómeno de la propagación rectilínea es completamente exacto. Pero si se limita por pantallas o aberturas la superficie de onda Σ , se suprimen algunos de sus puntos y, al mismo tiempo, otros tantos centros vibratorios. Se comprende, pues, que el estado vibratorio de los diversos puntos colocados más allá de Σ no sea el mismo que cuando la superficie de onda Σ estaba entera. A esto se deben los fenómenos de difracción, en cuya teoría no entraremos.

674. **Difracción por los sistemas ópticos.** — Poder separador de los aparatos de óptica. — Cuando las ondas luminosas encuentran un espejo o una lente, estos cuerpos limitan

* Este punto luminoso puede realizarse por un pequeño orificio, practicado en una placa metálica iluminada por un intenso foco de luz.

** Como la lente permite ver claramente los diversos puntos que se hallan en un plano determinado, se puede suprimir la pantalla.

*** El experimento que nos ha demostrado este fenómeno, realiza, a su vez, un fenómeno de difracción. En efecto, en dicho experimento, obsérvase que el movimiento vibratorio no queda en el ángulo limitado por las rectas que parten de S (fig. 408) y que se apoyan en los bordes de la abertura, sino que existe fuera de este ángulo, si bien con menor intensidad.

una porción de aquéllas, sin dejar de modificarlas. De ahí debe resultar un fenómeno de difracción.

Por ejemplo, si se vuelve el ojo de un objetivo de anteojo hacia una estrella, las ondas planas enviadas por esta estrella transfórmanse, merced al objetivo, en ondas esféricas cuyo centro es el foco de éste; pero, al entrar la superficie de onda en el anteojo, queda limitada por los bordes del objetivo.

De ahí, resulta que la imagen de la estrella no es un punto, sino un pequeño disco rodeado de anillos alternativamente luminosos y oscuros, y además, muy poco brillantes.

De donde se deduce que dos estrellas muy próximas producirán imágenes que podrán encajar una en otra de manera que no parezcan separadas.

Se ha demostrado que el diámetro del disco central de la imagen es inversamente proporcional al cuadrado del diámetro del objetivo.

Por otra parte, el poder separador del objetivo es tanto mayor cuanto más pequeña es la distancia angular de dos estrellas cuyas imágenes da. Según lo que antecede, esta distancia angular es inversamente proporcional al diámetro del objetivo.

Se podrá calcular el poder separador de un objetivo de diámetro cualquiera, sabiendo que un objetivo de 12 centímetros de diámetro separa la segunda, es decir permite ver, separadas, las imágenes de dos estrellas cuya distancia angular no es inferior a un segundo.

Análogas consideraciones pueden exponerse para los demás aparatos de óptica y, especialmente, para el microscopio. La limitación del poder separador por la difracción, impide, a pesar del aumento que se puede dar al aparato, distinguir uno de otro dos puntos que estén muy próximos.

675. **Difracción por gran número de hendiduras.** — **Redes.** — Llámanse *redes* en óptica a una serie de hendiduras muy finas separadas por intervalos oscuros iguales.

Realízase una red trazando en una lámina de vidrio, con la máquina de dividir, trazos paralelos muy próximos (50, 100, 500 trazos por milímetro, por ejemplo). Los trazos pueden considerarse como opacos en tanto que sus intervalos sean transparentes.

Hagamos incidir en una red plana que tenga sus trazos perpendiculares al plano de la figura 675 luz monocromática procedente de un colimador C cuya hendidura sea paralela a los trazos de la red, y veremos

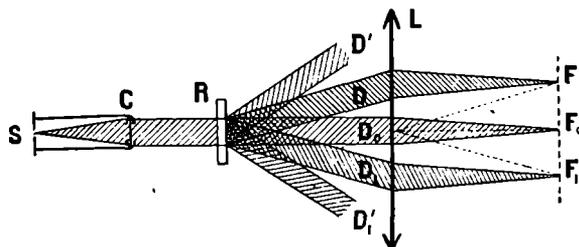


Fig. 675.

que, detrás de la red, la luz forma varios haces paralelos $D_0, D_1, D_1', D_2, D_2', D_3, D_3', \dots$. Uno de ellos, D_0 , prolonga el haz incidente; los otros están colocados simétricamente con relación a D_0 y se apartan cada vez más. Las intensidades de estos haces disminuyen rápidamente. Compruébase la exactitud de lo que precede, recogiendo la luz así difractada por la red, en una lente convergente L. En el plano focal de la lente se verán una serie de imágenes $F_0, F_1, F_1', F_2, F_2', F_3, F_3', \dots$ de la hendidura del colimador.

Llámanse *desviación* de un haz difractado al ángulo que éste forma con el haz incidente.

Si se cambia la luz monocromática que ilumina al colimador se observará que cambia también la separación de las imágenes: ésta aumenta cuando aumenta la longitud de onda de la radiación; la luz roja es, pues, más desviada por una red, que la luz violada.

La teoría de las redes, que no desarrollaremos, demuestra que el seno de la desviación de un haz difractado es proporcional a la longitud de onda de la luz incidente y varía en razón inversa de la distancia de los trazos de la red. Cuando la desviación es pequeña, puede, a su vez, considerarse como proporcional a la longitud de onda de la radiación*.

Espectros dados por las redes. — Si se ilumina con luz blanca la hendidura del colimador, cada imagen como F_1, F_1', \dots se transforma en un espectro que vuelve su color violado hacia la imagen central F_0 , que, en este caso, es blanca. Esto se comprende fácilmente, por lo que acabamos de explicar.

Si la lente L es suficientemente ancha para recoger varios haces difractados, se ven

* De la medida de la desviación de una radiación monocromática por una red, cuya distancia de las mallas se conoce, dedúcese la longitud de onda de la radiación. De este modo, pueden efectuarse medidas muy exactas de las longitudes de onda.

varios espectros en su plano focal, espectros que, a partir del segundo, encajan unos sobre otros, produciendo colores variados.

Espectroscopio de red. — Sustituyendo la lente L por un antejo, se constituye un verdadero espectroscopio, en que el prisma está reemplazado por una red y que puede servir para los mismos usos. Los espectros producidos por las redes tienen la ventaja de presentar los colores desviados proporcionalmente a su longitud de onda.

Redes por reflexión. — Rowland construyó redes formadas por trazos paralelos trazados en un espejo cóncavo. Iluminadas por la luz procedente de una hendidura paralela a los trazos, estas redes producian directamente espectros por reflexión, los cuales eran realmente notables, porque las radiaciones no atravesaban ningún medio absorbente, y, además, permiten estudiar las radiaciones infra-rojas y ultra-violadas.

676. *Coronas.* — *Azul del cielo.* — Si se mira un foco luminoso lejano, a través de una lámina de cristal espolvoreada con licopodio, se le ve rodeado de anillos coloreados, debidos a la difracción de la luz por los granos. Estos anillos se denominan *coronas*. Se observan coronas análogas, alrededor de la luna o del sol, cuando ante estos astros pasan nubes cuyas gotas de agua difractan la luz.

Si disminuye el diámetro de los corpúsculos que producen las coronas, el diámetro de éstas aumenta. Si el diámetro de los corpúsculos desciende a menos de la milésima de milímetro, las coronas, cada vez más ensanchadas, acaban por desaparecer, y el azul central invade todo el campo de la visión.

Por esta razón, el humo muy tenue parece azul. También, a la difracción por fino polvo en suspensión, atribuye Tyndall el color azul del cielo. Lord Rayleigh opina que la difracción puede ser producida por las mismas moléculas del aire.

DOBLE REFRACCIÓN

677. *Definiciones.* — La *doble refracción* es la propiedad que posee gran número de cristales llamados *birrefringentes*, entre los cuales debe citarse en primer término el *espato de Islandia*, de dar dos rayos refractados para cada rayo incidente: de donde



Fig. 676.

resulta que, cuando se mira un objeto a través de un cristal birrefringente se ve una imagen doble (fig. 676).

Esta propiedad se observa, en distintos grados, en todos los cristales que no pertenecen al sistema cúbico. Los cuerpos cristalizados según este sistema y todas las sustancias amorfas, como el cristal, no tienen doble refracción. No obstante, pueden adquirirla *accidentalmente*, ya por el *temple*, ya por una *compresión disimétrica*. Los cuerpos *monorefringentes* llámanse también cuerpos *isótropos* y los birrefringente, *anisótropos*.

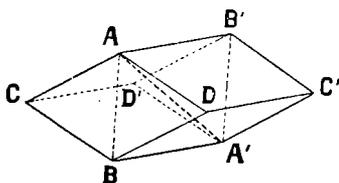


Fig. 677.

La doble refracción se explica suponiendo que la velocidad de la luz, en los cuerpos anisótropos, depende de la dirección de las vibraciones luminosas, y que, en los cuerpos isótropos, es independiente de dicha dirección. Ya hemos visto (247) que, bajo la influencia de una elevación de temperatura, se dilatan igualmente las sustancias isótropas, en todas direcciones, mientras que las anisótropas lo verifican desigualmente. Asimismo, los experimentos demuestran que las diversas propiedades, resistencia a la ruptura, conductibilidad calorífica, etc., que siguen una dirección dada,

dependen, en los cuerpos anisotropos, de esta direcci6n, en tanto que, en los isotropos, no dependen de ella.

678. Cristales de un eje. — Ley de Brewster. — En un cristal birrefringente, existen siempre una o dos direcciones segun las cuales no se observa mäs que la refracci6n simple, es decir, que no se ve sino una s6la imagen de los objetos. Estas direcciones denominanse *ejes 6pticos* de los cristales.

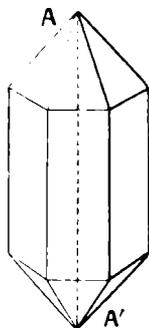


Fig. 678.

Ll6manse *cristales de un eje* a los que no presentan mäs que una sola direcci6n segun la cual no se bifurca la luz, y *cristales de dos ejes* los que ofrecen dos direcciones.

Los cristales de un eje mäs usados en 6ptica son el *espatto de Islandia*, el *cuarzo* y la *turmalina*.

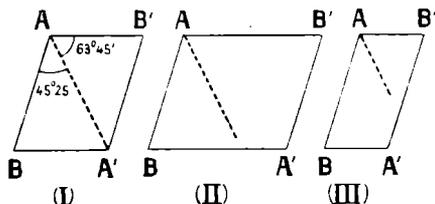


Fig. 679.

El espatto tiene la forma de un romboedro (fig. 677). Las caras, en n6mero de seis, son rombos que se re6nen de tres en tres, por sus 6ngulos obtusos, en los extremos de una recta AA' que es el *eje de cristalizaci6n*.

En realidad, en los cristales naturales (fig. 676) las caras se desarrollan desigualmente. Por otra parte, los cristales se *quiebran* con facilidad, es decir, se parten paralelamente a sus caras. De este modo, resulta que la forma regular que acabamos de describir solo se realiza excepcionalmente. Lo que permanece constante son los 6ngulos que forman las caras entre sı. En estas condiciones, puede decirse que, por todo punto del cristal, pasa un eje, porque todo punto podria por causa de quebraduras adecuadas, ser el v6rtice A o el A' de un romboedro como el ABCDA'B'C'D' (fig. 677).

El cuarzo o *cristal de roca* cristaliza en el sistema rombo6drico, bajo forma de un prisma hexagonal de seis caras, coronado por dos pir6midales hexagonales (fig. 678). La lınea que une los dos v6rtices de las pir6midales extremas es el *eje de cristalizaci6n*.

Ley de Brewster. — Brewster ha observado esta ley general: *En los cristales de un eje, el eje 6ptico coincide siempre con el de cristalizaci6n.*

Secci6n principal. — Ll6mase *secci6n principal* de un cristal a todo eje plano tal como ABA'B' (fig. 677), que pasa por el eje 6ptico AA' del cristal o que le es simplemente paralelo.

En el espatto, la secci6n principal mäs importante, es la que contiene las pequeıas diagonales ABA'B' de las caras ABCD y A'B'C'D'. La figura 679 representa esta secci6n principal: en (I), el caso de un verdadero romboedro; en (II), el caso de un cristal alargado; en (III), el caso de un cristal aplanado. En todos los casos, el eje forma con AB' un 6ngulo de 63°,45 y con AB un 6ngulo de 45°,25.

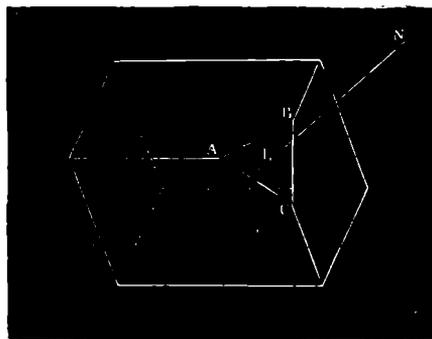


Fig. 680.

Todo rayo luminoso que incide en el cristal normalmente a una cara artificial, tal como ABC (fig. 680), cortada perpendicularmente al eje 6ptico NI, no se bifurca luego al refractarse, porque es paralelo al eje 6ptico del cristal.

679. Rayo ordinario y rayo extraordinario. — De los dos rayos refractados a que dan lugar los cristales de un eje, uno sigue siempre las leyes de la refracci6n simple; pero el otro no obedece, en general, a estas leyes. El primero de estos rayos se llama *rayo ordinario*, y el otro, *rayo extraordinario*. Las im6genes que les corresponden denominanse, a su vez, *imagen ordinaria* e *imagen extraordinaria*. Este fen6meno puede ponerse en evidencia de dos maneras:

Se hace incidir un rayo luminoso en un romboedro de espato, y salen de éste dos rayos, que van a marcar sus huellas OE en una pantalla (fig. 681). Si se hace girar el espato alrededor de la normal a la cara de entrada (es decir, dejando a esta cara en un mismo plano), de modo que, estando fijo el rayo incidente, lo esté también el plano de incidencia, se verá que cuando el plano de incidencia es cualquiera, uno de los rayos emergentes permanece inmóvil: éste es el *rayo ordinario*; el otro gira al mismo tiempo que el cristal alrededor del primer rayo: es el *rayo extraordinario*.

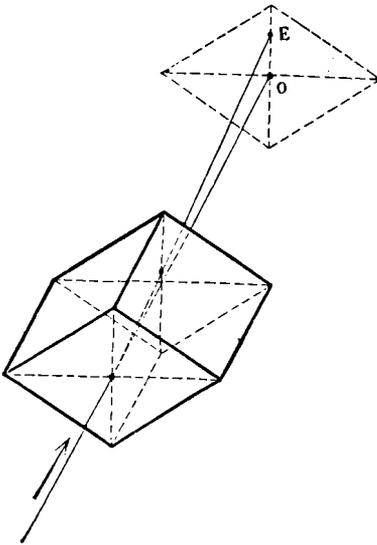


Fig. 681.

Por lo tanto, el rayo extraordinario no sigue la primera ley de la refracción, porque no se queda en el plano de incidencia. De todos modos, cuando el plano de incidencia coincide con una sección principal tal como $ABA'B'$ (fig. 682), el rayo extraordinario, como el ordinario, permanece en este plano; pero no sigue en él la ley de Descartes. En este caso, puede representarse la marcha de los dos rayos en una figura plana.

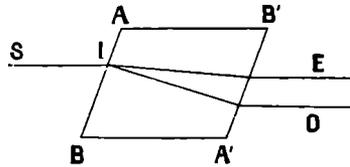


Fig. 682.

Un rayo SI da, a la salida, dos rayos paralelos O y E. El rayo ordinario se desvía más que el extraordinario.

En fin, los experimentos demuestran que, si el plano de incidencia es perpendicular al eje, el rayo extraordinario sigue las dos leyes de la refracción. En este caso, se puede definir un índice de refracción para el rayo extraordinario lo mismo que para el ordinario.

Cristales positivos y cristales negativos. — El rayo ordinario y el extraordinario tienen índices diferentes; en ciertos cristales el índice del rayo ordinario es mayor que el otro; en algunos pasa lo contrario. Fresnel llamó a los primeros *cristales negativos*; y *cristales positivos* a los segundos.

El espato de Islandia, la turmalina, el zafiro, el rubí, la esmeralda, la mica, el cianuro de potasio, el fosfato de cal, son *negativos*; el cuarzo, el circón, el hielo, la apofilita de un solo eje, son *positivos*. La clase de los cristales negativos es mucho más numerosa que la de los positivos.

680. **Doble refracción en los cristales de dos ejes.** — **Ley de Fresnel.** — Los cristales de dos ejes son muy numerosas. (Ejemplos: sulfatos de níquel, de magnesia, de barita, de potasa y de hierro, azúcar, mica, topacio del Brasil, etc.). En estos diferentes cristales, el ángulo de los dos ejes toma valores muy diferentes, pues varía desde 3 a 90 grados.

Fresnel descubrió por el cálculo, demostrando después experimentalmente, que ninguno de los rayos refractados sigue las leyes de la refracción simple en los cristales de dos ejes. Sin embargo, llamando *línea media* y *línea suplementaria* a las bisectrices del ángulo de los dos ejes y de su suplemento, se puede enunciar la siguiente ley: *En toda sección perpendicular a la línea media uno de los rayos refractados sigue las leyes de Descartes, y en toda sección perpendicular a la línea suplementaria, el que sigue estas leyes es el otro rayo.*

POLARIZACIÓN DE LA LUZ

681. **Definición experimental de la polarización.** — Huygens fué el primero en indicar que los dos rayos que proceden de la refracción de un mismo rayo incidente en un cristal de espato de Islandia poseen propiedades diferentes de las de la luz ordinaria.

Supongamos que se hace incidir un rayo luminoso S (fig. 683) en un primer espato P y que, a la salida, se intercepta el rayo extraordinario e por una pantalla. Hagamos

incidir, luego, el rayo ordinario o , en un segundo espato A. Este rayo dará, a su vez, un rayo ordinario o' y un rayo extraordinario e' , que pueden proyectarse en una pantalla. Pero, al revés de lo que ocurría en la luz natural, las dos imágenes o' y e' no tienen, en general, la misma intensidad, cuando la sección principal del espato A se coloca de cualquier modo. Si se hace girar el espato A alrededor del rayo o , varía la

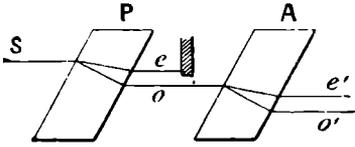


Fig. 683.

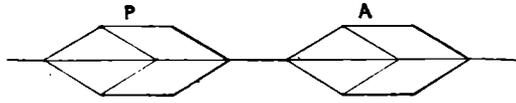


Fig. 684.

iluminación de las imágenes o' y e' . Si las secciones principales de los dos espatos son paralelas (fig. 684), la imagen o' brilla en su máximo y la imagen e' se apaga.

Al contrario: Si las secciones principales de los dos espatos son perpendiculares (fig. 685), se apaga la imagen o' y la imagen e' brilla en su máximo.

En posiciones simétricas a las que acabamos de definir cada imagen recobra la misma intensidad.

Luz polarizada. — De este experimento se deduce que la luz que constituye el rayo o ya no es luz natural: decimos que es luz polarizada*.

Plano de polarización. — Llámase plano de polarización del rayo o al plano que pasa por este rayo y en el cual hay que colocar la sección principal del espato A para que el rayo o' sea máximo y el e' se apague.

Ya que esto se cumple cuando las secciones principales de los dos espatos son paralelas, se deduce que: el plano de polarización del rayo ordinario o es el plano de la sección principal del espato P de que procede.

Dícese, también, que este rayo está polarizado en el plano de la sección principal del espato P.

Polarización del rayo extraordinario. — Si, inversamente, en el experimento anterior, se intercepta el rayo ordinario o y se hace incidir el rayo extraordinario e en el segundo espato (fig. 686), se observa que da también lugar a dos rayos o'' y e'' . Pero, si se hace

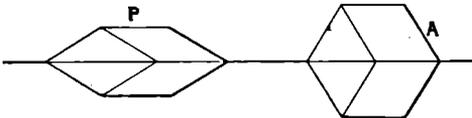


Fig. 685.

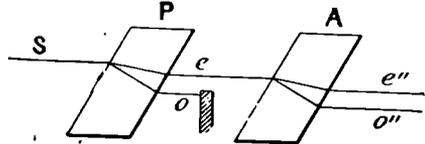


Fig. 686.

girar al segundo espato, el rayo o'' brilla con un máximo y el rayo e'' se apaga, cuando las dos secciones principales son perpendiculares.

Por el contrario, el rayo ordinario o'' se apaga y el e'' brilla en su máximo si las dos secciones principales son paralelas.

De este experimento se deduce que el rayo extraordinario e es también un rayo de luz polarizada; pero que su plano de polarización es perpendicular al del rayo o .

El rayo extraordinario e está, pues, polarizado perpendicularmente a la sección principal del espato P que lo engendra.

OBSERVACIÓN. — *Polarizador y analizador.* — El primer espato P que polariza la luz, se llama polarizador. El otro espato, A, que indica que la luz de los rayos o y e está polarizada, denominase analizador.

Por tanto, un espato puede, a voluntad, constituir un polarizador o un analizador. Dícese que es un polarizador o un analizador birrefringente.

682. Polarizadores y analizadores monorrefringentes. — Nicol. — Los polarizadores monorrefringentes son aparatos que, para todo rayo incidente de luz natural, producen un solo rayo polarizado. También pueden servir de analizadores.

Prisma de Nicol. — Para construir un prisma de Nicol (o, simplemente, un nicol),

* Más particularmente, denominase luz polarizada *rectilíneamente*, para distinguirla de la luz polarizada *elípticamente* y de la polarizada *circularmente* (686).

so toma un romboedro do espato de Islandia y se corta en dos, según un plano perpendicular al plano de las diagonales pequeñas de las bases; luego, se pegan las dos mitades con bálsamo del Canadá. La figura 687 representa el corte de un nicol.

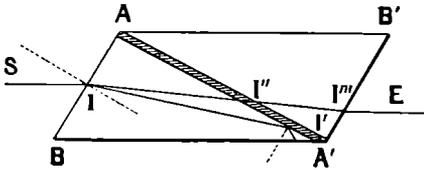


Fig. 687.

Como el índice de refracción del bálsamo del Canadá es menor que el índice ordinario del espato de Islandia, pero mayor que su índice extraordinario, resulta que cuando un rayo luminoso SI penetra en el prisma, el rayo ordinario puede sufrir reflexión total en la superficie AA', mientras que el extraordinario pasa simplemente.

Antes, se determina la inclinación de la sección AA' de modo que el ángulo de

incidencia del rayo ordinario en I' sea suficiente para que se produzca este fenómeno.

Puesto que el rayo que pasa es el extraordinario, *el nicol proporciona luz polarizada perpendicularmente a su sección principal.*

Si se hace pasar sucesivamente la luz a través de dos nicoles, la luz polarizada por el primero atraviesa el segundo, si las secciones principales de los dos nicoles son paralelas (fig. 684); al contrario, se *apagará*, por el segundo, si las secciones principales son perpendiculares (fig. 685), ó, como se dice, si los nicoles están *crucados*.

683. **Turmalina.** — La turmalina es un borosilicato de aluminio cristalizado en el sistema hexagonal. Si se toma una lámina de turmalina paralela al eje, absorbe el rayo ordinario y deja pasar el extraordinario. Tal lámina de turmalina puede, pues, servir de polarizador ó de analizador monorrefringente. Si se disponen sucesivamente dos turmalinas paralelas, la luz que atraviesa a la primera, atraviesa también a la segunda, si los ejes son paralelos, y es apagada por ésta, si son perpendiculares.

Las turmalinas se emplean poco como polarizadores y analizadores, a causa de su coloración verde y de su mediana transparencia.

684. **Polarización por reflexión y por refracción simple.** — Malus descubrió que la luz reflejada por una lámina de cristal puede, en las condiciones que vamos a detallar, ser apagada por un nicol. Por consiguiente, es polarizada. Para estudiar este fenómeno,

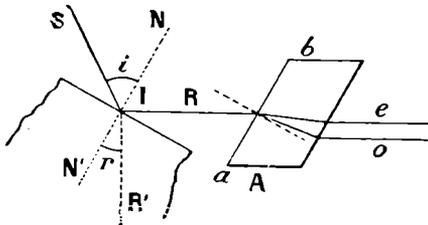


Fig. 688.

puede hacerse incidir un rayo SI (688) en una lámina de cristal aluminada (para no conservar más que el rayo IR reflejado en la primera cara) y recibir este rayo en un espato analizador A. Si es cualquiera el ángulo de incidencia, obsérvese que haciendo girar el espato A, no se pueden apagar completamente los rayos *o* y *e* que salen de él, debido a que la luz IR no está polarizada por completo. Pero, con conveniente incidencia, *i* (igual a $55^{\circ}, 25'$, para el cristal ordinario), que llamaremos *ángulo de polarización* o *incidencia brewsteriana*, la luz de IR queda enteramente polarizada, y se ve que el rayo *o* brilla con el máximo y que el *e* se apaga, cuando la sección principal del espato A es paralela al plano de incidencia SIN. De donde se deduce que *el rayo reflejado IR se polariza en el plano de incidencia.*

Ley de Brewster. — Todos los cuerpos pueden, lo mismo que el cristal, polarizar la luz por reflexión, más o menos completamente y bajo ángulos de polarización muy diversos. Los metales son los cuerpos que tienen menor poder polarizante.

En cuanto a los ángulos de polarización, varían con las diversas sustancias, según la ley siguiente, debida a Brewster:

El ángulo de polarización es el ángulo de incidencia para el cual el rayo reflejado R es perpendicular al refractado R'.

El ángulo de polarización es, pues, un ángulo cuya tangente es igual al índice de refracción.*

Polarización por refracción simple. — En la refracción simple, el rayo refractado se encuentra polarizado igualmente; pero, en un plano perpendicular al plano de inci-

* En efecto, tenemos $r = 90^{\circ} - i$, y, por consiguiente:

$$\frac{\text{sen. } i}{\text{sen. } r} = \frac{\text{sen. } i}{\text{cos. } i} = n, \quad \text{de donde} \quad \text{tg. } i = n.$$

dencia. Por tanto, ambos rayos, el reflejado y el refractado, que corresponden a un rayo incidente único, están polarizados en planos rectangulares.

OBSERVACIÓN. — También puede servir de analizador un espejo de cristal que polariza la luz. Si, en efecto, por un primer espejo se recibe luz polarizada, en un segundo espejo de cristal y bajo la incidencia browsteriana, el rayo reflejado que se obtiene brilla con un máximo cuando los planos de incidencia en los dos espejos son paralelos, y se apaga, si estos planos son perpendiculares.

De este modo, puede utilizarse un rayo de luz polarizada por un procedimiento cualquiera. El segundo espejo apagará la luz cuando el plano de incidencia sea perpendicular al plano de polarización del rayo incidente.

685. Explicación de la polarización. — **Vibraciones transversales del éter.** — Para explicar la polarización de la luz, Fresnel supone que en un rayo de luz polarizada, las moléculas de éter efectúan vibraciones transversales, es decir perpendiculares al rayo. En efecto, si las vibraciones fuesen longitudinales, no se comprendería que un nicol pudiera apagar completamente la luz, o dejarla pasar cuando se le hace girar en torno del rayo luminoso.

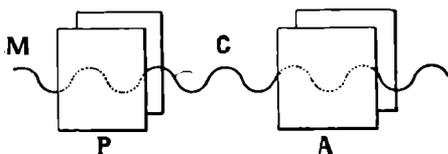


Fig. 689.

Un rayo luminoso polarizado puede compararse a una cuerda, que efectúe vibraciones transversales en un plano dado.

Para imprimir a la cuerda tales vibraciones puede introducirse en un sistema de dos láminas paralelas P (fig. 689), por ejemplo, verticales, y hacerla vibrar en M, con la mano. Después de pasar por P, las vibraciones se orientan forzosamente en un plano vertical. Si, luego, se coloca la cuerda en un segundo sistema A, análogo a P, A dejará pasar las vibraciones si es vertical, es decir, paralelo a P (fig. 689). Por el contrario, las apagará, si es horizontal (fig. 690), esto es, perpendicular a P. Este experimento es del todo análogo al que hemos efectuado con un rayo luminoso que atraviesa sucesivamente dos nicols.

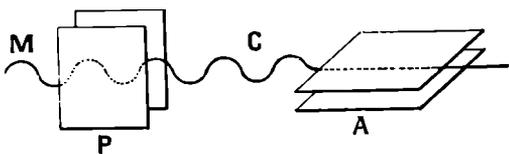


Fig. 690.

Admitiremos, con Fresnel, que, en la luz natural, las vibraciones son bien perpendiculares al rayo; pero que el plano en que se producen varía sin cesar. Un polarizador tiene, por objeto orientar las vibraciones en un plano determinado, que se denomina *plano de vibración* y que vamos a definir exactamente.

686. Plano de vibración. — **Polarización elíptica y polarización circular.** — *El plano de vibración de un rayo polarizado es el plano que pasa por el rayo y en el cual se efectúan las vibraciones del éter.* — Ya hemos definido el plano de polarización de un rayo, que es un plano que pasa por el rayo. Fresnel, en su teoría de la polarización, admite que estos planos son perpendiculares (fig. 691). Por otra parte, en los experimentos que hemos efectuado, no hay nada que nos permita probarlo.

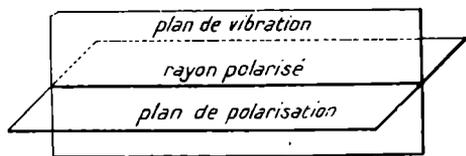


Fig. 691.

Según esto, cuando un rayo atraviesa un espato, el rayo ordinario vibra perpendicularmente a la sección principal y el extraordinario vibra en la sección principal. En este último caso se encuentra el rayo que sale de un nicol. En la polarización por reflexión, el plano de vibración es perpendicular al plano de incidencia del rayo.

Polarización elíptica y polarización circular. — **Polarización cromática.** — En ciertos fenómenos de polarización se llega a deducir que las moléculas de éter describen ora elipses, ora circunferencias, en un plano perpendicular al rayo. En este caso, dicese que la luz se polariza elíptica o circularmente.

Estos casos se presentan cuando rayos polarizados rectilíneamente por un primer nicol atraviesan una lámina de un cuerpo birrefringente. Así se ve que es imposible apagar la luz con un analizador. Si se hace el experimento en luz blanca, la luz que se

observa así a la salida del analizador os coloreada y por eso se ha dado al fenómeno el nombre de *polarización cromática*, el cual proviene de la diferencia de fase que el rayo ordinario y el extraordinario adquieren al atravesar el cuerpo birrefringente. Este fenómeno sirve para descubrir una débil refringencia. Para esto se colocan dos nicoles *crucados* P y A (fig. 692) en el trayecto de un rayo de luz simple; el ojo que mira por S' no ve ninguna luz. Se interpone entre los dos nicoles una lámina Q de un cuerpo transparente. Si la luz reaparece y no puede ser apagada dando vuelta al analizador sobre sí mismo, eso quiere decir que el cuerpo es birrefringente.

De este modo se demuestra también que ciertos cuerpos isótropos pueden volverse birrefringentes, en diversas circunstancias. Así, el vidrio bien templado o bien comprimido o estirado es birrefringente; los aisladores isótropos se vuelven birrefringentes en un campo eléctrico (944).

687. **Polarización rotatoria.** — Hagamos pasar entre dos nicoles cruzados P, A (fig. 692),

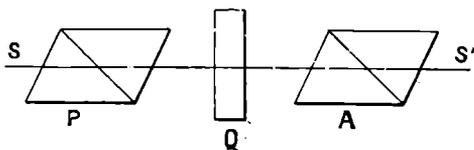


Fig. 692.

un rayo de luz monocromática; esta luz se apaga. Pero, interpongamos entre los nicoles una lámina delgada de cuarzo, Q, cortada perpendicularmente al eje; observaremos que la luz reaparece. Se vuelve a apagar, haciendo girar un poco el analizador, bien en el sentido de las agujas de un reloj, o bien en el inverso, según la muestra de cuarzo elegida. De donde

se deduce que la lámina de cuarzo ha hecho girar al plano de polarización de la luz. Dicese que el cuarzo posee *poder rotatorio*.

Se dice que el cuarzo es *recto* o *dextrogiro* cuando hace girar hacia la derecha al plano de polarización es decir, cuando, para producir la extinción, el observador que recibe el rayo S' debe dar vuelta al analizador en el sentido de las agujas de un reloj. En caso contrario, llámase *izquierdo* o *levogiro* *.

Biot ha descubierto las leyes de la polarización rotatoria del cuarzo.

LEYES : 1ª *La rotación del plano de polarización varía con las diferentes radiaciones simples, y es tanto más grande, cuanto menor es la longitud de onda de éstas.*

Biot observó que una lámina de cuarzo de 1 milímetro de espesor hace girar al plano de polarización de un rayo rojo cerca de 17°30', y al de un rayo violado, 44°5'.

2ª *Para una misma radiación simple y para placas del mismo cristal, la rotación es proporcional al espesor.*

688. **Poder rotatorio de los líquidos.** — Experimentos de Biot. — Hasta 1815, no se conocía más que el poder rotatorio del cuarzo. En esta época observó Biot la misma propiedad en gran número de líquidos, tales como el agua azucarada, la solución de ácido tártrico, la esencia de trementina, etc. Operaba con luz simple; pues con la blanca habría obtenido fenómenos de coloración menos fáciles de apreciar que la extinción. Primero notó que, considerando los líquidos o las disoluciones que tienen el poder rotatorio, unos hacen girar a la derecha el plano de polarización, como el *cuarzo recto*. y los otros a la izquierda. como el *cuarzo alabeado*. A las primeras les dió el nombre de sustancias *dextrogiros* : talos son el *azúcar de caña* (disuelto en el agua), la *esencia de limón*, la *tintura de alcanfor* (disolución alcohólica de alcanfor), la *dextrina*, el *ácido tártrico*; a las otras denominó *levogiros* : tales son el *aguarrrás* o *esencia de trementina*, la *esencia de laurel* y la *goma arábiga*.

Además, descubrió que la rotación producida por los líquidos es mucho menor que la del cuarzo, dada igualdad de grueso. Así, el jarabe de azúcar de caña concentrado, que es una de las sustancias más activas, hace girar *treinta y seis veces menos* que el cuarzo.

Ley de Biot. — La rotación impresa al plano de polarización por una misma sustancia o disolución depende — en igualdad de circunstancias — del grado de concentración de esta disolución, así como del grueso de la capa líquida atravesada por la luz. Biot determinó la ley de estas variaciones.

La rotación del plano de polarización producida por una solución activa es propor-

* En estos experimentos, conviene escoger láminas delgadas de cuarzo. Si, en efecto, se operase con un cuarzo derecho, pero de tal grueso que produjera una rotación del plano de polarización superior a 180°, una rotación del analizador, en sentido inverso al de las agujas de un reloj y menor que 180°, provocaría la extinción y podría confundirse la muestra de cuarzo derecho con *cuarzo izquierdo*.

cional a la masa de la sustancia disuelta en la unidad de volumen del líquido neutro y a la longitud del tubo en que se observa.

Por ejemplo, la experiencia prueba que, operando con azúcar seco, precisa disolver 16'29 g. en 0,1 litro de agua y observar la disolución en un tubo de 20 centímetros para obtener la misma rotación que con una placa de cuarzo de 1 milímetro de grueso.

689. Aplicaciones de la polarización rotatoria. — Polarímetros y sacarímetros. — La determinación del poder rotatorio de las diferentes sustancias activas proporciona un magnífico medio para conocer el grado de concentración o el de pureza de sus soluciones. He aquí un ejemplo de esta aplicación. Sabemos que si se disuelven 16 gr. 29 de azúcar puro, en un decilitro de agua y se analiza la solución en un tubo de 20 cm., se hace girar de 21°,40' el plano de polarización de los rayos amarillos. Esta es la rotación que se obtendría con una placa de 1 mm. de cuarzo derecho.

Supongamos que quiere conocerse la cantidad de azúcar puro que contiene un azúcar industrial. No habrá más que pesar 16, gr. 29 de esta sustancia, disolverlos en un decilitro de agua pura, filtrar y clarificar la solución, verterla en un tubo de 20 cm. de longitud e investigar la proporción en que hace girar hacia la derecha las vibraciones amarillas. Los aparatos fundados en este principio, denominanse *polarímetros*. En vez de proceder directamente de este modo, puede, también, hallarse el espesor del *cuarzo izquierdo* que hay que superponer a la solución para que su rotación quede anulada. Si, por ejemplo, observamos que se necesita una placa de 0,80 mm. reconoceremos que el *azúcar bruto* analizado contenía un 80 por 100 de *azúcar cristalizable*. Los aparatos que emplean este método, denominanse, particularmente, *sacarímetros*. No existe ningún procedimiento de análisis químico tan seguro ni tan expeditivo como este método físico.

El análisis de los azúcares es la aplicación más frecuente de la polarización rotatoria, lo cual ha hecho que a este método de análisis se le dé el nombre de *sacarametría*, y el de *sacarímetros* a los aparatos empleadas para aplicar el método. Pero no sólo los usan los industriales. De la misma manera puede, el fisiólogo, estudiar las variaciones de la albúmina en la sangre y demás líquidos del organismo; el médico puede seguir en el sacarímetro el curso de la enfermedad llamada *diabetes sacarina*.

Polarímetro de Laurent. — El polarímetro más empleado y exacto es el *polarímetro de penumbra* de Laurent. Vamos a describir el modelo más reciente, construido por Jobin.

Principio. — El aparato se compone de un nicol polarizador P (fig. 693 y 694), ilumina-

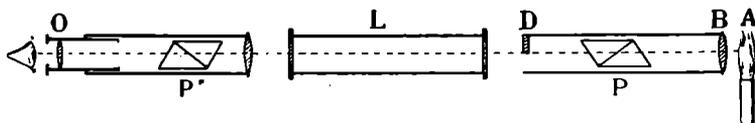


Fig. 693.

nado por la luz amarilla de un quemador A de sodio. La luz que atraviesa el polarizador encuentra una lámina de cuarzo D, de espesor conveniente, cortada paralelamente al eje * y que sólo cubre la mitad del diafragma en que está montada. Su borde, paralelo a su sección principal, forma cierto ángulo con el plano de polarización de la luz (además puede variarse este ángulo, dando vueltas al polarizador mediante la palanca U X J). Los rayos luminosos atraviesan luego el tubo L que contiene el líquido estudiado y penetran en un antejo que comprende al nicol analizador P'.

La montura de este nicol puede girar por medio de un piñón que obedece a un botón G que engrana en un círculo perpendicular a L. En su rotación arrastra consigo a una alidada que contiene un nonio, el cual se mueve ante las divisiones del círculo. Con la lente N, se observan estas divisiones, iluminadas por el espejo M. El círculo contiene dos divisiones, una en grados, y otra en centésimas de azúcar puro (división sacari-métrica). La primera sirve para medir la rotación de un líquido cualquiera.

La segunda sirve para los azúcares, y exime de todo cálculo. También se puede hacer girar el analizador por medio del tornillo F que no arrastra consigo el nonio.

Para regular el aparato, se coloca el cero del vernier frente al cero de la división del círculo. Levántase el tubo L y, mirando por el ocular O, se enfoca en el diafragma D.

* Es una lámina *semi-onda*, es decir, que introduce entre los dos rayos refractados que proporciona para el incidente, una diferencia de marcha de una semilongitud de onda.

En general, las dos mitades del campo aparecen con diferente iluminación (fig. 695 *a* o *c*). Entonces, se da vuelta al analizador por medio del tornillo F hasta que las dos mitades del campo aparezcan ligera y débilmente iluminadas (fig. 695 *b*).

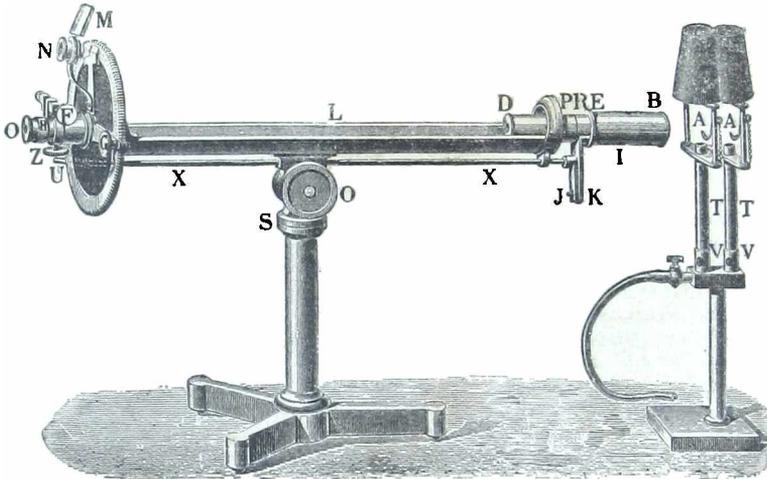


Fig. 694.

Intercálase el tubo L, de 20 centímetros, por ejemplo, que contiene el líquido por estudiar; supongamos que sea dextrógiro (por ejemplo, una solución de 16 g. 29 de azúcar, en 1 decilitro de agua, o bien *glucosa*, *azúcar de diabetes*, etc.). Se enfoca, y las dos mitades del campo aparecen de nuevo desigualmente iluminadas. Restablécese la apariencia *b* (fig. 695) de las iluminaciones, dando vuelta al botón G hacia la derecha. Y entonces, se lee, ya el ángulo en que el nonio ha girado, que es el ángulo en que el líquido ha hecho girar al plano de polarización, ya, si se trata de azúcar, el número de centésimas de azúcar puro indicado por la división sacaráimétrica.

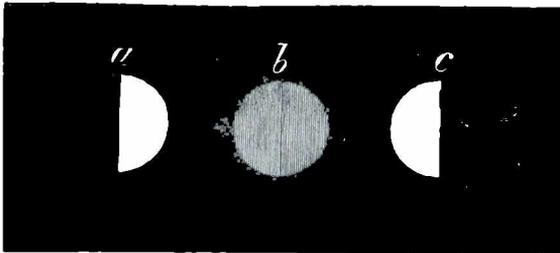


Fig. 695.

Si la sustancia es *levógiro* (azúcar trastocado, levulosa, etc.), para restablecer la apariencia *b* (fig. 695) es preciso volver a la izquierda el botón G.

Sacaráimetro de Laurent. — El sacaráimetro, destinado únicamente al estudio de los azúcares, tiene cierto número de órganos idénticos a los del polarímetro: éstos son el po-

larizador, el diafragma de lámina de cuarzo, el tubo que contiene la sustancia estudiada, el antejo de observación y el nicol analizador.

Sólo se han representado (fig. 696) las partes en que los sacaráimetros se diferencian de los polarímetros. Las medidas se efectúan por medio de un *compensador*. Este es un sistema (representado encima de G, fig. 696) compuesto de una lámina de cuarzo derecho D (fig. 697) y de otra de cuarzo izquierdo QQ' más gruesa que D; pero dividida en dos prismas de ángulo muy agudo, que un botón de cremallera G (fig. 696) permite mover en el sentido de las flechas (fig. 697) o en el opuesto, de modo que se pueda aumentar o disminuir a voluntad el espesor del cuarzo derecho interpuesto.

En particular, si este espesor es igual al de D el sistema no introduce rotación alguna.

* Consígnese este resultado cuando la dirección de la vibración que puede dejar pasar con el máximo el analizador es bisectriz del ángulo de las vibraciones que corresponden a los dos campos luminosos.

Produce una, a la derecha, si el espesor de QQ' es menor que el de D , y a la izquierda, si es mayor. Una de las láminas de QQ' lleva consigo un vernier que se mueve ante una regla graduada R (fig. 696).

No hace falta, cuando menos para el examen de los azúcares, iluminar el aparato con luz amarilla; puede emplearse cualquier luz*.

El sacarimetro se regula colocando primero el cero del nonio enfrente del cero de la regla, por medio del botón G . Mirando por el ocular, se hace girar el analizador, mediante el botón F , hasta realizar la apariencia b (fig. 695). Interpónese la solución azucarada (que es dextrógira), se enfoca y se actúa en el botón G , para comunicar al

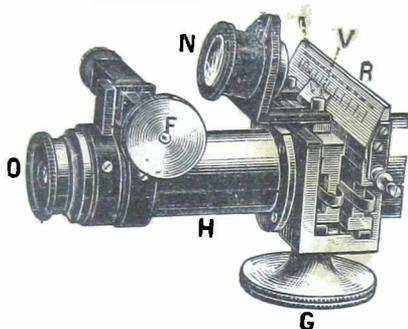


Fig. 696.

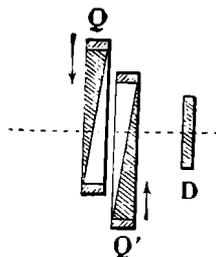


Fig. 697.

compensador un espesor tal que destruya la rotación dada por el azúcar. De este modo, se restablece la apariencia b . Léese la división de la regla que se halla en frente del cero del nonio. Esta división se efectúa de tal manera que indica el número de centésimas de azúcar puro contenido en el azúcar estudiado (cuando se han disuelto 16 g. 29 en un decilitro de agua, y que se observa a través de un espesor de 20 cm.). La división 100 corresponde al azúcar puro o, lo que es lo mismo, a la rotación de $21^{\circ}40'$ dada por una placa de cuarzo de 1 milímetro de espesor.

La exactitud de la graduación puede comprobarse, interponiendo, en vez del tubo, una placa de cuarzo derecho y constatando que la apariencia b queda restablecida cuando el cero del vernier se halla frente a la división 100 de la regla.

Por medio de este aparato, puede estudiarse también un líquido levogiro (azúcar trastocado, etc.). En este caso, colócase, a continuación del tubo, una lámina de cuarzo derecho, de 1 milímetro de espesor; se restablece la igualdad de tonos, como de ordinario y, para obtener el grado sacarimétrico a la izquierda, basta, evidentemente, restar el número leído en el vernier del que da el valor de la placa, es decir de 100.

* Esto se debe a que se compensa la rotación del azúcar, por la rotación inversa de una lámina de cuarzo y a que la ley que liga la rotación de una radiación con su longitud de onda es, poco más o menos, la misma para las dos sustancias.

LIBRO VIII

MAGNETISMO

CAPÍTULO I

PROPIEDADES DE LOS IMANES

690. **Imanes : definiciones.** — Los imanes son trozos de acero que tienen la propiedad de atraer al hierro y sus componentes, aleaciones y aceros. Esta propiedad, denominada *propiedad magnética*, fué descubierta primeramente en ciertas clases de óxido de hierro (llamado *óxido magnético* Fe^3O^4) que se hallan imantadas naturalmente : son los *imanes naturales*. Se la comunica de modo más regular e intenso a los imanes *artificiales*, que son generalmente pedazos de acero en forma de barras prismáticas o cilíndricas, o bien de agujas aplanadas que forman rombos alargados (fig. 699) o, en fin, en forma de herradura (fig. 706).

691. **Polos de los imanes.** — Si se hace rodar una barra imantada, por limaduras de hierro, se verá que éstas se adhieren en gran cantidad a los extremos de aquélla, a modo de borlas erizadas (fig. 698). Las dos regiones próximas a los extremos, en las cuales se manifiesta el máximo de atracción, denominanse *polos*. Cuando el imán es muy largo, las regiones donde se adhiere la limalla son muy pequeñas, y se pueden comparar a puntos. Ya veremos (700) que, en un imán cualquiera, los dos puntos contiguos a sus extremos son propiamente los polos.

Si hacemos movable a un imán, alrededor de un eje vertical, colocándolo en un pie (fig. 699) o bien, suspendiéndolo de un hilo muy



Fig. 698.

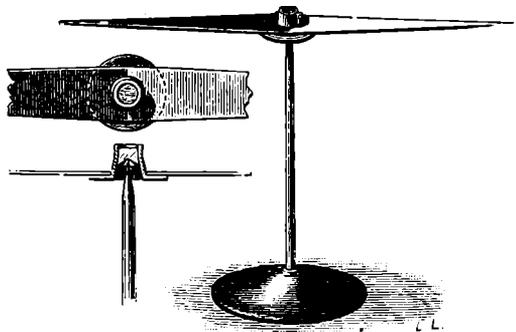


Fig. 699.

fino (fig. 700), observaremos que, tras una serie de oscilaciones, queda fijo en una posición tal, que la línea recta que une sus polos se orienta sensiblemente de Norte a Sur. De este modo, designanse los polos con los nombres de *polo norte* y *polo sur*, según los polos terrestres*.

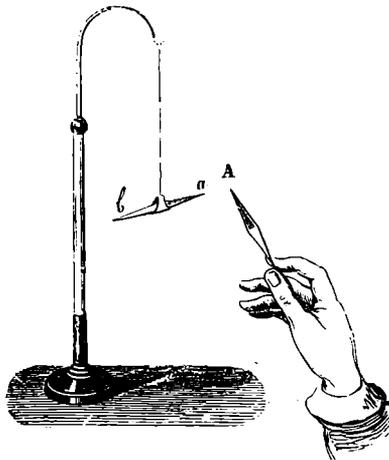


Fig. 700.

Es lógico admitir que tal orientación se debe a la acción que la Tierra ejerce sobre el imán.

692. Acciones mutuas de los polos de los imanes. — Si al polo norte de un imán móvil *a* (fig. 700) se presenta el polo norte *A* de otro imán, se notará una repulsión; pero, si, al contrario, el mismo polo *A*, se acerca al polo sur *b* de la aguja móvil, se origina una atracción. Asimismo, el polo sur del imán, puesto en la mano, produce dos acciones contrarias sobre los polos *a* y

b; pero en distinto sentido: uno engendra repulsión, y atracción, el otro.

De ahí se deduce que, al hallarse en presencia dos imanes, *los polos de mismo nombre se repelen y los de nombre contrario se atraen.*

693. Leyes de las atracciones y de las repulsiones magnéticas. — *La atracción o repulsión ejercidas entre los dos polos de un imán varían en razón inversa del cuadrado de su distancia.*

En efecto, colocando a distancias variables los polos de los imanes, se ve que sus acciones mutuas disminuyen rápidamente, al mismo tiempo que sus distancias aumentan.

Midiendo exactamente las fuerzas, obsérvese que, si se duplica o triplica la distancia de los polos, la atracción o la repulsión se hace 4 o 9 veces más pequeña.

La ley ha sido establecida por los experimentos de Coulomb, el cual medía la fuerza ejercida entre ambos polos del imán, por medio de su *balanza de torsión* (89). Sus experimentos eran poco exactos; pero no por eso es menos cierta la ley, porque, todas las consecuencias que de ella se deducen han sido halladas conformes con la realidad (713).

694. Masa magnética. — Se dice que dos polos norte poseen la misma *masa magnética*, cuando ejercen la *misma acción* sobre un tercer polo colocado a la misma distancia.

Además, se ha convenido en decir que la masa magnética de un polo norte de un imán varía *proporcionalmente a la fuerza que ejerce sobre otro polo norte invariable.*

Esto quiere decir que si un polo norte *N'* ejerce, sobre un polo *N*, una fuerza 2, 3, 4 veces mayor que la ejercida por otro polo *N''* sobre el

* Generalmente sólo se suprime en una mitad *S* la capa de óxido que se forma al templear el acero, de modo que la otra mitad *N* conserve un ligero color *azulado*.

mismo polo N, situado a la misma distancia, la masa magnética de N' es 2, 3, 4 veces más grande que la de N''.

Por medio de experimentos, se observa que los polos norte y sur de un imán ejercen sobre los demás imanes, en igualdad de condiciones, fuerzas de la misma magnitud, pero de sentido contrario. Este importante fenómeno se expresa diciendo que la *masa magnética del polo sur de un imán es igual, en valor absoluto, a la masa magnética de su polo norte, pero de signo contrario.*

La masa magnética de un polo norte es, por convenio, *positiva*; la del polo sur, *negativa*.

Unidad de masa magnética. — En el sistema cegesimal se toma como unidad de masa magnética: *la masa magnética de un polo que repele a otro polo de igual masa magnética, situado a una distancia de un centímetro con fuerza igual a una dina.*

Fórmula. — Según esto, si dos masas magnéticas m y m' están situadas a d cm. una de otra, se atraen o se rechazan, según sus signos, con una fuerza $f = \frac{mm'}{d^2}$ dinas*.

695. **Imantación por influencia.** — Si se coloca un pedazo de hierro o acero A (fig. 701) cerca de un imán NS, se convierte él mismo en imán.

Si lo acercamos al polo norte N por ejemplo, se observa que su extremo más próximo s es un polo sur y su extremo más lejano, un polo norte. Cuanto más cerca está A del imán NS, tanto mayor

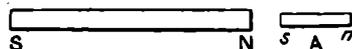


Fig. 701.

es la intensidad de la imantación que adquiere; ésta será máxima, si aquél se halla en contacto con la región polar. Este fenómeno, denominado *imantación por influencia*, explica la formación de las borlas de limaduras que se adhieren a los polos de los imanes. Las partículas en contacto con el imán se convierten en otros tantos imanes pequeños, y obran del mismo modo sobre las partículas próximas, y así sucesivamente.

Si se trata de hierro dulce, la imantación es *instantánea*. En el acero templado, se efectúa más lentamente y es menos intensa. Pero si se aleja el trozo de hierro dulce del imán que lo ha imantado, la imantación desaparece por la influencia del menor choque; mientras que el acero conserva gran proporción de su magnetismo, después de sustraído a la acción magnetizadora. De ahí la posibilidad de tener imanes permanentes de acero.

También se puede comunicar la propiedad magnética de un imán, sin que pierda nada, a otro trozo de acero. El mejor resultado se obtiene frotando, en el mismo sentido, la aguja por imantar, con el polo del imán; pero prácticamente los imanes intensos y regulares se fabrican mediante corrientes eléctricas (828).

* Esta fórmula indica, al mismo tiempo que su intensidad, el sentido de la fuerza que se ejerce entre dos polos del imán. Basta considerar como positiva una fuerza de repulsión y como negativa una fuerza de atracción. De este modo, cuando m y m' tienen igual signo, $f > 0$ (repulsión). Si m y m' son de signos contrarios $f < 0$ (atracción).

696. **Campo magnético de un imán.** — Una pequeña aguja imantada móvil (colocada sobre un pie, por ejemplo) situada cerca de un imán sufre acciones de su parte; oriéntase en una dirección que varia según la posición que se le dé. Llámase *campo magnético* de un imán la región del espacio en que, de este modo, puede ejercer acciones sobre una aguja imantada.

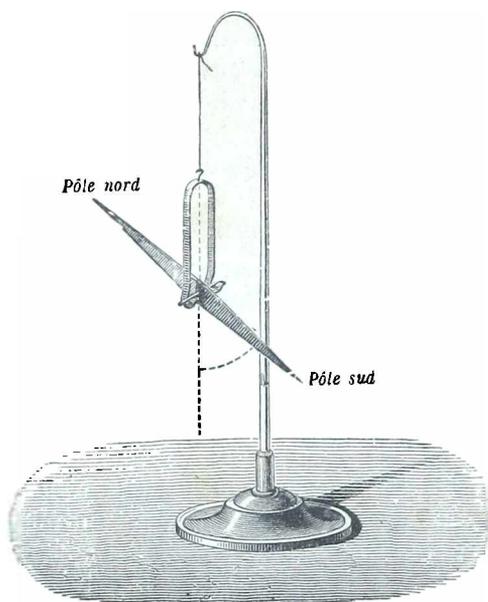


Fig. 702.

su centro de gravedad (fig. 702) y colocando los extremos de este eje en una chapa de cobre, suspendida de una potencia por un hilo fino. Sea cual fuere la orientación de la aguja, la acción de su peso queda siempre destruída por la resistencia del soporte, y si la aguja no estuviese imantada, estaría en equilibrio indiferente en cualquiera posición. Coloquemos esta aguja cerca de un imán; si es suficientemente corta, el hilo de suspensión permanece vertical, y la aguja se orienta en dirección determinada. En caso de que la acción del imán sea muy grande con respecto a la que ejerce la Tierra, dicha dirección de equilibrio define la

dirección del campo magnético del imán en el punto en que se encuentra la aguja.

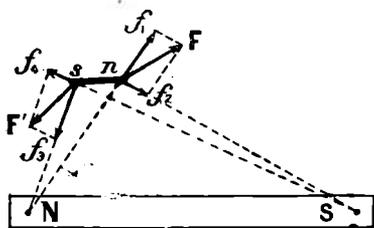


Fig. 703.

poco más o menos, iguales: lo mismo ocurre con las intensidades de las fuerzas $f_1 f_3$. De igual manera, el polo S rechaza a s y atrae a n con dos fuerzas f_2 y f_4 , de intensidades sensiblemente iguales entre sí; pero

Teóricamente, el campo magnético de un imán, aislado de cualquier otra sustancia magnética, se extiende infinitamente; pero, prácticamente, la acción del imán deja de ser sensible a muy poca distancia, que depende de la intensidad de su propia imantación.

La posición de equilibrio que adquiere la aguja depende no sólo de las acciones magnéticas que sufre; sino también de su peso. El efecto de éste puede suprimirse fijando a la aguja un eje horizontal que pase por

La dirección que la aguja adopta se explica fácilmente. En la posición ns (fig. 703) por ejemplo, el polo norte N del imán rechaza al polo norte n con una fuerza f_1 y atrae al polo sur s con una fuerza f_3 . Si la aguja ns es muy corta, las distancias de n y s a N son,

diferentes de la intensidad de las fuerzas f_1 y f_3 , porque N y S no están a la misma distancia de n y s. Las fuerzas f_1 y f_2 , por una parte, y f_3 y f_4 , por otra, se componen en dos fuerzas F F' iguales y paralelas, y la aguja no puede hallarse en equilibrio sino cuando se coloca en la dirección común de estas dos fuerzas, de manera que éstas se equilibren.

De un modo preciso, llámase dirección y sentido de un campo magnético cualquiera, en un punto n, a la dirección y al sentido de la fuerza F que se ejerce en el polo norte colocado en este punto.

697. **Intensidad de un campo magnético. — Gaus.** — *La intensidad de un campo magnético cualquiera, en un punto n del espacio, es el número de dinas que mide la intensidad de la fuerza ejercida sobre un polo de masa magnética igual a la unidad colocada en n.*

La unidad cegesimal de intensidad de campo magnético es, pues, la intensidad de un campo magnético que ejerce en la unidad de masa magnética, una fuerza igual a una dina. A esta unidad se ha dado el nombre de gaus. Si un polo de masa magnética μ está en un punto de un campo magnético en que la intensidad de este campo es H, la fuerza a la cual está sometido el polo es $F = \mu H$ dinas.

698. **Líneas de fuerza. — Fantasmas magnéticos.** — *Llámase líneas de fuerza de un campo magnético a las que, en cada uno de sus puntos, son tangentes a la dirección del campo magnético en este punto.*

Las líneas de fuerza se explican por el experimento siguiente: Aplicase contra una barra horizontal un cartón delgado que se espolvorea con una capa de limaduras de hierro; éstas se colocan espontáneamente formando curvas regulares que van de un polo a otro (fig. 704).

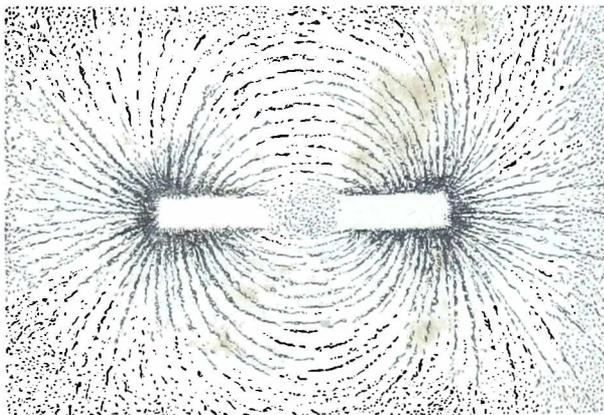


Fig. 704.

La producción de esta imagen, llamada *espectro* o *fantasma magnético* se explica de este modo. Cada grano de limadura, que es más o menos alargado, por la influencia de la barra se convierte en una pequeña aguja imantada, y ésta se orienta en la dirección del campo, en el punto donde se hallaba. Las líneas de limaduras hacen ver, pues, cuál es, en cada punto, la dirección del campo del imán. Por lo tanto, están dirigidas según las líneas de fuerza.

Sentido de las líneas de fuerza. — El sentido de una línea de fuerza, en uno cualquiera de sus puntos, es el sentido de la acción ejercida sobre un polo norte colocado en este punto. Por ejemplo, en un imán rectilíneo, las líneas de fuerza parten de la región norte N (fig. 705)

(que rechaza a un polo norte próximo) para entrar en los diversos puntos de la región sur S (que atrae a un polo norte).

699. **Campo de un imán de herradura.** — El fantasma magnético de un imán en forma de herradura (fig. 706) presenta, primero, las líneas de fuerza que parten de la region norte para pene-

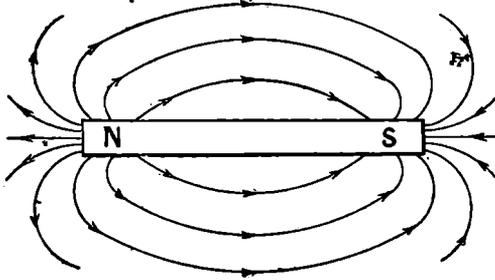


Fig. 705.

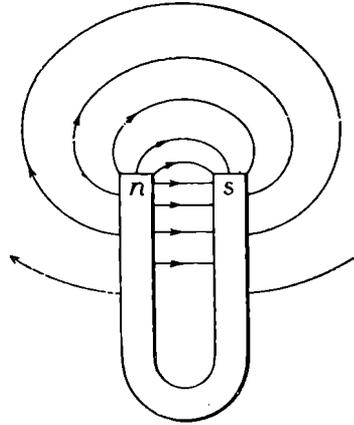


Fig. 706.

trar en la región sur; luego, entre las ramas supuestas paralelas, las líneas de fuerza que son paralelas. En estos puntos, el campo es más intenso que en los demás y es *casi uniforme*, es decir, que tiene *igual dirección e intensidad* en todos sus puntos.

El campo magnético terrestre (701) y el campo que existe en el interior de un solenoide (795) nos ofrecen ejemplos de campos magnéticos perfectamente uniformes.

700. **Acción de un campo uniforme en un imán.** — Definición exacta de los polos. — **Momento magnético de un imán.** — Colocado un imán en un campo uniforme, todo punto de cada una de las regiones polares sufre una acción paralela al campo. Las acciones ejercidas en los puntos de la región norte, como forman un sistema de fuerzas paralelas, pueden componerse, y el punto N (fig. 707) de aplicación de la resultante se denomina *polo norte* del imán. Del mismo modo, las fuerzas ejercidas en los puntos de la región sur se componen en una sola fuerza SE, aplicada a un punto S que se llama *polo sur* del imán. La experimentación demuestra (702): que las dos fuerzas NF y SF son rigurosamente iguales si el campo es perfectamente uniforme.

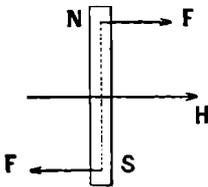


Fig. 707.

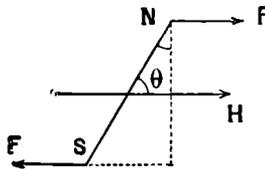


Fig. 708.

Si μ representa el valor absoluto común de la masa magnética de los dos polos del imán y H, la intensidad del campo, el valor común de la intensidad de ambas fuerzas será μH .

Momento magnético de una barra imantada. — Las dos fuerzas iguales y contrarias aplicadas a ambos polos del imán, constituyen un par que tiende a hacerlo girar de modo a llevarlo en la dirección del campo.

El momento del par de rotación será $C = 2 l F$. para la posición perpendicular al campo (fig. 707); llamando $2 l$ a la distancia de los polos. Reemplazando a F por su valor, tendremos $C = 2 l \mu H$.

Si el imán forma un ángulo θ con la dirección del campo (fig. 708) el momento C_θ será

$$C_\theta = F \times 2 l \text{ sen. } \theta = C \text{ sen. } \theta.$$

El producto $2l$ u de la distancia de los polos por la masa magnética de uno de ellos se denomina *momento magnético* de la barra imantada; represéntase por la letra M . Luego se puede expresar

$$C = MH \text{ y } C_{\theta} = MH \text{ sen } \theta.$$

CAPÍTULO II

MAGNETISMO TERRESTRE

701. **Campo magnético terrestre.** — Como los imanes sufren acciones en la superficie de la Tierra, debemos deducir de ahí, que en todo lugar del globo existe un campo magnético, al cual se da el nombre de *campo magnético terrestre*.

Dirección. — En un lugar dado, suspendamos una aguja imantada de su centro de gravedad (fig. 702, 710). Tras de algunas oscilaciones, la aguja se fija en una posición inclinada sobre la horizontal; uno de sus polos se dirige hacia el Norte por *debajo* del plano horizontal que pasa por el centro de la aguja; el otro polo dirígese hacia el Sur y por

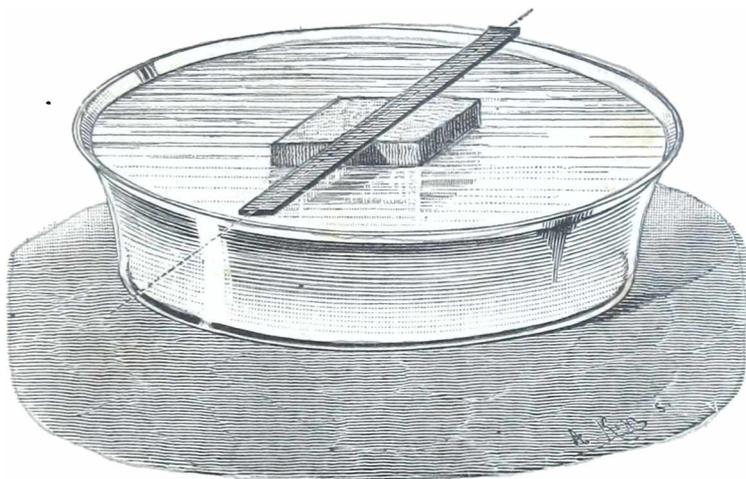


Fig. 709.

encima del horizonte. La dirección de esta aguja define la del campo magnético terrestre.

Se observa que esta dirección es la misma en todos los puntos de un lugar dado (poco alejados unos de otros). Luego las líneas de fuerza del campo terrestre son paralelas.

La intensidad de este campo es demasiado pequeña para repetir en él el experimento del fantasma magnético.

702. **Par terrestre.** — Los experimentos indican que la acción de la Tierra sobre un imán se reduce a dos fuerzas iguales, paralelas y de

sentidos contrarios, aplicadās en sus dos polos y que, por consiguiente, tienden a orientar el imán en su propia dirección.

En efecto, por medio de pesadas muy exactas, se ha observado que una barra de acero pesa exactamente lo mismo antes de la imantación que después de ella; luego *la acción magnética terrestre no tiene componente vertical*.

Además, si en un vaso lleno de agua, se coloca un flotador de corcho, y sobre éste, una barra imantada (fig. 709), aquél oscila y se queda en la posición Norte-Sur; pero sin que se produzca translación en una dirección cualquiera: luego *la acción magnética terrestre no tiene componente horizontal*.

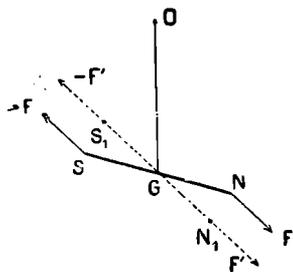


Fig. 710.

Y, puesto que el sistema de fuerzas magnéticas terrestres no tiene componente vertical ni componente horizontal, deducimos que debe reducirse a un *par*: a éste se le denomina *par terrestre*. Su existencia es, pues, un hecho experimental. Quedará completa-

mente definido si se conoce *su dirección* en un lugar dado y el *momento* de la acción que ejerce en un imán determinado.

Si se coloca en una posición cualquiera una aguja imantada NS (fig. 710), suspendida por su centro de gravedad, las dos fuerzas iguales F y $-F$, aplicadas a sus dos polos y que forman un par, la orientarán en su propia dirección N_1S_1 y se equilibrarán.

703. — **Declinación e inclinación magnéticas.** — **Meridiano magnético.** — La experimentación

enseña que la dirección de la aguja imantada en equilibrio no es exactamente la de norte-sur. Está situada en un plano vertical que no coincide con el *meridiano geográfico*: este plano vertical denominase *meridiano magnético* del lugar.

La *meridiana magnética* es la intersección del meridiano magnético y del plano horizontal.

Llámanse *declinación magnética* al ángulo D (fig. 711) que forman entre sí el meridiano geográfico y magnético; se

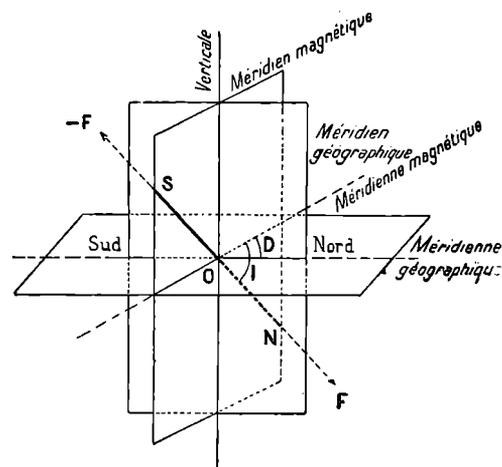


Fig. 711.

mide por el ángulo de las dos meridianas, geográfica y magnética. En París, la declinación es, *actualmente*, occidental, es decir, que el polo norte de la aguja en equilibrio está un poco al Oeste del meridiano geográfico; el 1º de Enero de 1912 en París, era igual a $14^{\circ}14'$.

Se da el nombre de *inclinación magnética*, al ángulo I que forma con

el horizonte la aguja imantada en equilibrio: su valor, en París, en 1º de Enero de 1912, era 64°41'.

704. **Aguja de declinación.** — Se puede hacer mover una aguja alrededor de un eje vertical y que se quede en un plano horizontal: por ejemplo, se coloca la aguja en un pie y se lastra la parte sur, para impedir que el polo norte se sitúe debajo del horizonte: de este modo se obtiene una *aguja de declinación*.

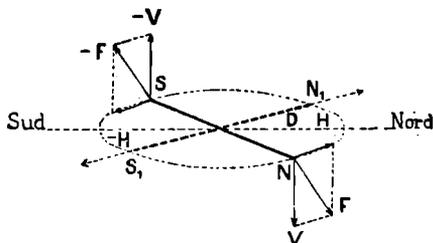


Fig. 712.

Descompongamos cada una de las fuerzas F y $-F$ (fig. 712) que se ejercen sobre los polos N y S , en dos fuerzas H y V , por una parte, y $-H$ y $-V$, por otra; H y $-H$, y $-V$ y $-V$ verticales. La acción del par $V, -V$, se destruye por el aumento de carga que se da a la aguja: bajo la acción del par $H, -H$, cuyas fuerzas son paralelas al meridiano magnético, la aguja dará vueltas y se colocará en la posición N_1S_1 , es decir según el meridiano magnético.

El ángulo de la posición de equilibrio N_1S_1 y de la meridiana geográfica es, pues, igual a la declinación.

705. **Intensidad del campo magnético terrestre y de sus componentes.** — La intensidad F del campo terrestre puede considerarse como resultante de dos componentes: una horizontal, H (fig. 712), y otra vertical V . Si nos fijamos en que, en el triángulo NHF , el ángulo en N es igual a la inclinación, vemos que

$$H = F \cos. i \quad \text{y} \quad V = F \text{ sen. } i.$$

En 1º de Enero de 1912 los valores de la intensidad del campo terrestre y de sus componentes eran:

Campo total	0.4616 gaus.
Componente horizontal	0.1974 —
Componente vertical	0.4173 —

706. **Brújula marina o compás de mar.** — La *brújula marina* o *compás de mar* (fig. 713 y 714) es un aparato magnético que se emplea en el mar, para dirigir la marcha de los buques. Consiste en una caja de cobre llamada *cubeta*, suspendida de tal manera que conserva la posición horizontal a pesar del balanceo y las sacudidas del barco. Para esto se aplica el método llamado suspensión a la Cardan. La caja está sujeta por dos soportes *aa'* que forman un eje horizontal. Estos soportes se hallan, a su vez, contenidos en un círculo móvil alrededor de otros dos soportes *bb'* que forman un eje horizontal perpendicular al primero. Sea cual fuere la orientación del navio, la caja conserva la posición en la cual la vertical del centro de gravedad pasa por el punto de intersección de los dos ejes.

En el fondo de la caja B hay un pie vertical fijo, en torno del cual se mueve una barra imantada, o, mejor dicho, un conjunto de varias agujas imantadas. El sistema magnético está fijo en un disco de mica, de diámetro algo mayor, en el cual están trazados los grados del círculo

y las direcciones de los puntos cardinales y de los intermedios. La dirección designada por N indica el meridiano magnético. El conjunto constituye la *rosa de los vientos*.

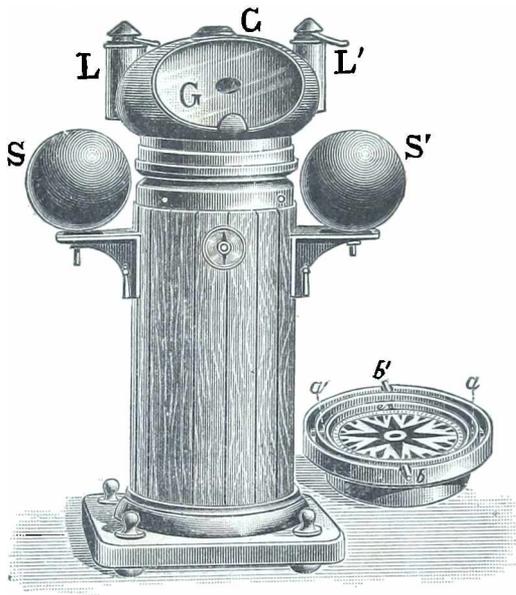


Fig. 713.

Además, en la caja B, hay un trazo llamado *línea de fe*, que se halla situado en el eje del barco.

La brújula se coloca en la popa del navío, dentro de la bitácora.

La figura 713 representa la vista exterior de una bitácora de compás del modelo de la Marina de Guerra francesa. La caja de la brújula está cubierta de una capa de cobre C que contiene dos lámparas L y L' que, de noche, proyectan su luz en la rosa de los vientos. El timonel puede ver a ésta, a través del cristal G.

La indicación de la brújula puede ser errónea por la acción de las masas de hierro que

constituyen la mayor parte del buque y que se imantan por la acción magnética del campo terrestre. Esta acción se *compensa* mediante un conjunto de mecanismos debidos a los trabajos de Poisson, Airy, Smith, Flinders, y que lord Kelvin determinó de modo perfecto. El efecto de los hierros verticales se compensa por barras verticales de hierro dulce colocadas en la bitácora (*barrotes Flinders*). El de los hierros horizontales se compensa por un conjunto de barritas imantadas, colocadas debajo

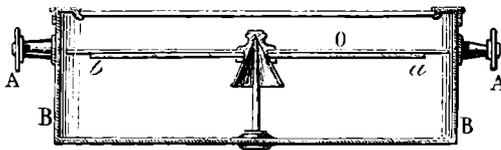


Fig. 714.

de la rosa, unas, paralelamente a la quilla del buque y otras, en dirección perpendicular, y por dos esferas de hierro S y S' que se disponen convenientemente respecto de la brújula.

Para dirigir un barco, se determina en el mapa la dirección que ha de dársele. De este modo, teniendo en cuenta la declinación, se obtiene el ángulo que su eje debe formar con la aguja de la brújula. Así, el timonel, con el ojo fijo en la brújula, da vuelta al timón hasta que la dirección determinada coincida con la línea de fe, y debe conservar siempre esta dirección.

Es preciso que la rosa sea muy móvil y que el momento magnético del imán sea todo lo grande posible. Por esta razón, siguiendo las indicaciones de Kelvin, se substituye la aguja única por 4 u 8 agujas para-

lelas. Kelvin ha probado también que la tranquilidad de una rosa se obtiene aumentando cuanto se pueda su periodo de oscilación alrededor del eje vertical y disminuyendo el periodo en torno de los ejes horizontales de la suspensión.

Compases líquidos. — En los barcos pequeños, es difícil conseguir suficiente reposo de la rosa de los vientos. Obtiénese sumergiéndola en una mezcla de agua y de alcohol. De est modo, la rosa pesa menos en su soporte y se amortiguan sus oscilaciones. Los compases así contruidos denominanse compases líquidos.

707. **Medida de la declinación.** — **Brújulas de declinación.** — La declinación magnética en un lugar dado se mide mediante *brújulas de declinación*.

Una brújula de declinación consta principalmente de una aguja imantada AB (fig. 715) móvil sobre un pie bien vertical y cuyos extremos se mueven en un círculo graduado. Hace falta saber por qué divisiones del círculo pasa la meridiana geográfica NS. En los aparatos de precisión, se efectúa esta determinación por medio de un *teodolito**, que forma parte del mismo aparato. Después, mídese, en el círculo, el ángulo

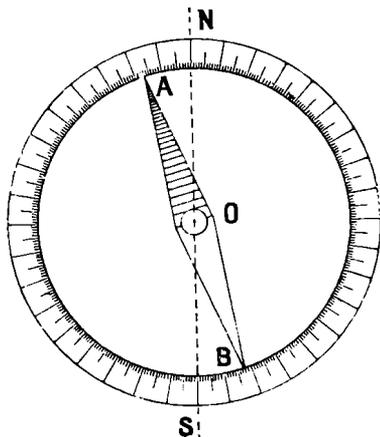


Fig. 715.

del eje de la aguja y la meridiana geográfica. Este ángulo sería la declinación si la línea de los polos de la aguja coincidiese exactamente con la línea de puntos, lo que, en rigor, nunca es exacto.

Pero la aguja está simplemente colocada en su chapa, y no fija en ella; por consiguiente se la puede sacar y, después de darle vuelta instalarla de nuevo en su sitio. Efectúase entonces una segunda observación y se toma la media de los dos resultados, la cual, como se verá fácilmente, es la verdadera declinación.

Brújula de declinación de Brünner. — Para medidas de precisión empléase la brújula de declinación de Brünner. Tal aparato (fig. 716) está constituido por un teodolito, que comprende un círculo vertical graduado C, móvil alrededor de un eje vertical y cuyas rotaciones se miden en un círculo horizontal C'. Alrededor de un eje horizontal, perpendicular al plano del círculo C y que pasa por el centro de este círculo, giran un anteojo L y un microscopio M.

El anteojo está destinado a determinar el meridiano geográfico por medio de la observación del sol o de una estrella. Cuando el aparato se halla instalado en sitio fijo, puede usarse una mira lejana situada en el meridiano.

Si el plano vertical en que se mueve el eje del anteojo está en el meridiano, se nota, en el círculo C', la posición del círculo C por medio de pequeños microscopios m, m' .

El microscopio M sirve para ver los extremos de una barra imantada suspendida de un hilo de seda sin torsión F, en una caja cilíndrica horizontal de bronce T, cerrada por dos cristales de caras paralelas. La barra tiene, incrustados en sus extremos, dos pequeños discos de plata, en cada uno de los cuales hay trazado un trazo vertical. Se da vuelta al limbo vertical de modo que el microscopio pueda ver el trazo de uno de los

* Un teodolito es un aparato astronómico que sirve para definir la posición de un astro en el cielo y, por consiguiente, para determinar el meridiano de un lugar.

extremos del imán. Se mira, del mismo modo, al otro extremo y, para determinar el plano vertical que pasa por los dos trazos, se toma el diámetro medio de las dos posiciones del círculo C marcadas en el círculo C' por los microscopios *m*, y *m'*, el cual será el meridiano magnético si el plano de los trazos del imán contiene al eje magnético. Se repiten las mismas operaciones, después de dar vuelta a la barra sobre si misma y se toma la media entre ambas determinaciones.

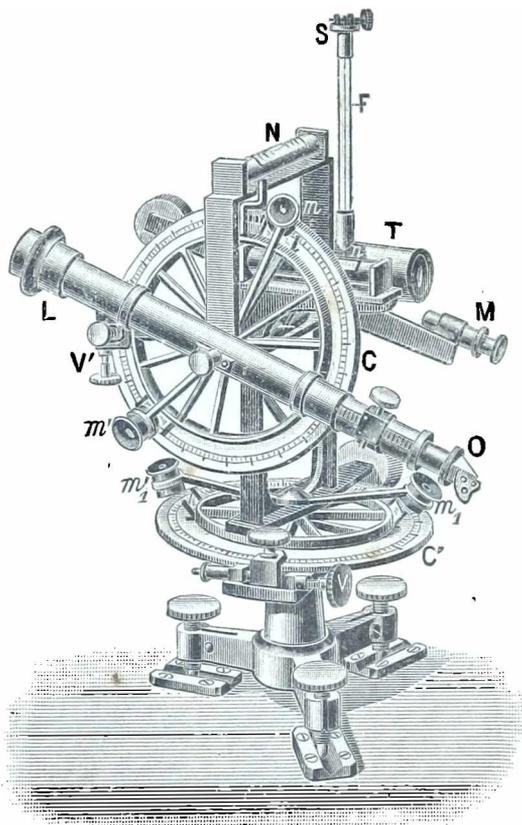


Fig. 716.

Medidas de las variaciones de la declinación. — Declinómetros. — Cuando se quiere simplemente estudiar las variaciones de la declinación, basta colocar en una aguja imantada móvil alrededor de un eje vertical, un pequeño espejo cóncavo con el cual se proyecta un haz luminoso (480) en una escala graduada. En esta escala, se pueden seguir las variaciones de la declinación. El aparato se llama *declinómetro*. Es más práctico (481) registrar fotográficamente las variaciones de la declinación.

708. Variaciones de la declinación. — La declinación varía mucho de un lugar a otro; es occidental en Europa y África, y oriental en Asia y en las dos Américas.

Líneas isógonas. — Llámase *línea isógona* al lugar geométrico de los puntos del

globo que tienen igual declinación. Estas líneas tienen formas más o menos irregulares que obedecen a anomalías locales.

Meridianos magnéticos. — Se da el nombre de meridianos magnéticos a líneas que se suponen trazadas en el globo terrestre y que son, en cada uno de sus puntos, tangentes a la dirección de la aguja de declinación. Si, partiendo de un punto del globo, nos dirigiésemos siempre en la dirección de la aguja imantada, seguiríamos uno de estos meridianos.

Polos magnéticos. — Después de seguir un camino más o menos irregular, todos los meridianos magnéticos llegan a dos puntos casi diametralmente opuestos, llamados *polos magnéticos*. El polo Norte magnético está situado cerca de la isla Melville. El polo Sur magnético se halla en tierra Victoria. Además, su posición es variable.

Anomalías locales. — *Mapas magnéticos de Francia.* — En ciertas regiones más o menos extensas, la declinación presenta variaciones irregulares cuando se pasa de un punto a otro.

A falta de número suficiente de puntos de observación convenientemente repartidos,

se ha admitido, durante mucho tiempo, que la distribución de los elementos magnéticos era regular en la superficie de Francia. Las primeras determinaciones efectuadas por Moureaux en 1884 y 1885, pusieron en evidencia, en diferentes regiones, apartamientos singulares que parecían debidos a una causa física, y que, de este modo, demostraban la necesidad de un estudio más completo.

Moureaux ha realizado nuevas observaciones con aparatos de viaje construidos por Brüner bajo la dirección de Abadie y Mascart, las cuales han servido de base para la construcción de nuevos mapas magnéticos.

Citaremos también las investigaciones de Brunhes en las notables perturbaciones del magnetismo en las regiones de Puy-de-Dôme y las de Matias en la región de Tolosa.

Variaciones con el tiempo. — En un mismo lugar, la declinación presenta numerosas variaciones; unas, que podemos considerar como regulares, son seculares, anuales o diurnas; las otras, irregulares, se designan con el nombre de *perturbaciones*.

1º. *Variaciones seculares.* — La aguja de declinación ejecuta en un mismo punto del globo, al este y al oeste del meridiano astronómico, oscilaciones que duran varios siglos. Se conoce la declinación en París desde el año 1580: entoces era de $11^{\circ}30'$ al *este*; fué disminuyendo hasta 1666, en que era nula, y después pasó al *oeste*, aumentando sin cesar hasta 1814, en que era de $22^{\circ}34'$ al *oeste*; de entonces acá, la aguja vuelve hacia el oriente. La declinación disminuye actualmente de $3'$ a $4'$ por año.

2º. *Variaciones anuales.* — Las variaciones anuales fueron señaladas por Cassini, en 1784. El máximo de variación observado ha sido de 20 minutos. Por lo demás, estas variaciones anuales son poco conocidas y no parecen constantes.

3º. *Variaciones diurnas.* — La declinación experimenta variaciones diurnas muy pequeñas y que sólo es posible observar por medio de instrumentos muy sensibles. En París, la amplitud media de la variación diurna es, en los meses de Abril, Mayo, Junio, Julio, Agosto y Septiembre, de 13 a 15 minutos, y, en los demás, de 8 a 10 minutos. La amplitud de las variaciones diurnas disminuye desde los polos hacia el ecuador, donde es muy pequeña. Cerca del ecuador existe una línea sin variación diurna.

La amplitud de las variaciones de la declinación está en relación con el número de manchas del sol, es decir, con la mayor o menor actividad solar. La causa de esta influencia es desconocida.

Perturbaciones. — *Tempestades magnéticas.* — *Auroras boreales.* — La declinación de la aguja imantada es alterada en sus variaciones diurnas por perturbaciones repentinas llamadas *tempestades magnéticas*. Estas coinciden con otros varios fenómenos: auroras boreales (1068), erupciones volcánicas, temblores de tierra.

El efecto de las auroras boreales se deja sentir a grandes distancias. Auroras que sólo son visibles en el Norte de Europa actúan también sobre la aguja de París, donde se han observado variaciones accidentales de 20 minutos. En las regiones polares, la aguja oscila, a veces, algunos grados. La irregularidad de su marcha durante todo el día que precede a la aurora boreal es un presagio del fenómeno.

709. **Medida de la inclinación.** — **Brújulas de inclinación.** — La inclinación magnética, en un lugar dado, se mide por medio de la *brújula de inclinación*.

En este aparato, la aguja N S (fig. 717) es móvil alrededor de un eje horizontal y sus extremos se mueven en un círculo graduado vertical que es movable en torno de un eje vertical ZZ'. Si se coloca el plano del limbo en el meridiano magnético, su inclinación la dará el ángulo de la aguja con el plano horizontal. La teoría demuestra que si se coloca la aguja en un plano vertical que no sea el meridiano magnético, su inclinación varía: es mínima en el meridiano magnético, e igual a 90° en un plano perpendicular. Por lo tanto, bastará hacer girar el círculo alrededor de ZZ' y tomar el ángulo menor que forma la aguja con el horizonte.

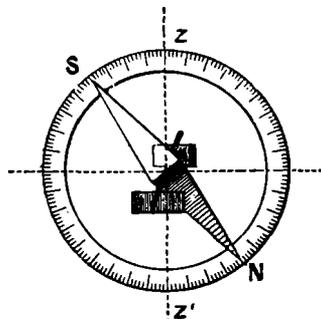


Fig. 717.

Causas de error y correcciones. — Existen dos causas de error, que conviene tener en cuenta :

1º. El eje magnético de la aguja puede no coincidir con su eje de figura : de ahí, un error que se corrige por el método de inversión.

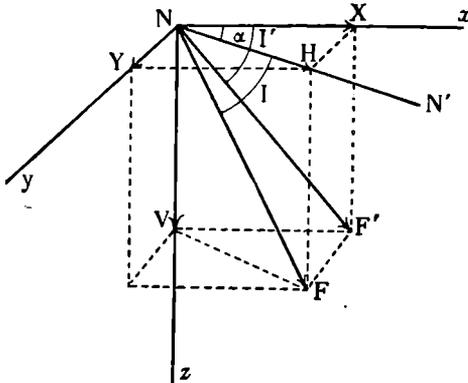


Fig. 718.

dirección NF con su proyección sobre el plano horizontal xNy es la inclinación I ; y el plano vertical xNN' , que pasa por la dirección NF, es el meridiano magnético. Descompongamos la fuerza F , según tres direcciones rectangulares cualesquiera. Sean, primero, las dos componentes H y V en el plano del meridiano : tienen por valores respectivos :

$$H = F \cos. I, \quad V = F \operatorname{sen.} I.$$

Descompongamos, ahora, la componente horizontal H , según dos ejes rectangulares cualesquiera Nx , Ny colocados en su plano, llamando α al ángulo xNN' , tendremos :

$$\begin{aligned} X &= H \cos. \alpha = F \cos. I \cos. \alpha. \\ Y &= H \operatorname{sen.} \alpha = F \cos. I \operatorname{sen.} \alpha. \end{aligned}$$

De ahí, resultan inmediatamente las consecuencias siguientes :

1º. Si la aguja es móvil en un plano vertical, su ángulo con la horizontal no medirá la inclinación I hasta que su azimut coincida con el meridiano magnético.

2º. En todo otro azimut, cada polo estará sometido a dos fuerzas X y V o a su resultante F' . El ángulo que, en esta posición de equilibrio, forme la aguja con el horizonte, será un ángulo I' diferente de I . Ahora bien, tenemos :

$$\operatorname{tg.} I' = \frac{V}{X} = \frac{F \operatorname{sen.} I}{F \cos. I \cos. \alpha} = \frac{\operatorname{tg.} I}{\cos. \alpha}.$$

Vemos, pues, que, si $\alpha = 90^\circ$, tendremos $\operatorname{tg} I' = \infty$. Por consiguiente, la inclinación aparente $I' = 90^\circ$.

710. *Brújula de inclinación de Brünner.* — En esta brújula (fig. 719), la aguja descansa en dos ejes situados sobre dos planos de ágata, y termina en dos puntas muy afiladas frente a las cuales hay dos microscopios M y M' , sostenidos por una montura solidaria de un eje horizontal.

Este eje, en su rotación, arrastra un círculo graduado C (fig. 720) situado en el exterior de la caja que contiene la aguja. Las divisiones del círculo se mueven ante microscopios fijos m , m' . El conjunto es móvil alrededor de un eje vertical y sus rotaciones se evalúan en el círculo horizontal C' . De este modo, se puede colocar en diversos azimutes el plano en que se mueve la aguja. Mídese la inclinación en un azimut dado dando vuelta al ojo horizontal de modo que los dos microscopios miren los dos extremos de la aguja. La graduación del círculo C permite medir la inclinación. Para operar con el máximo de precisión, se coloca la aguja en el meridiano magnético, es decir, en el plano bisector de los dos azimutes para los cuales tiene igual valor la inclinación. Para eliminar el error debido a la falta de coincidencia de los ejes geométricos y magnéticos se hace otra observación volviendo 180° la caja y se toma la media de las dos medidas.

Además, hay que imantar la aguja en sentido inverso, repetir las mismas medidas y tomar la media entre este resultado y el precedente, para eliminar el error que resulta por no estar en el eje de rotación el centro de gravedad.

711. **Variaciones de la inclinación. — Polos, ecuador y paralelos magnéticos.** — La inclinación varía de un lugar a otro, según una ley bien determinada.

En el hemisferio boreal el polo norte se sumerge debajo del horizonte. Si se sigue un meridiano magnético cualquiera, dirigiéndose hacia el norte, la inclinación aumenta; es igual a 90° , al llegar al polo Norte magnético. Si se sigue el meridiano magnético en sentido

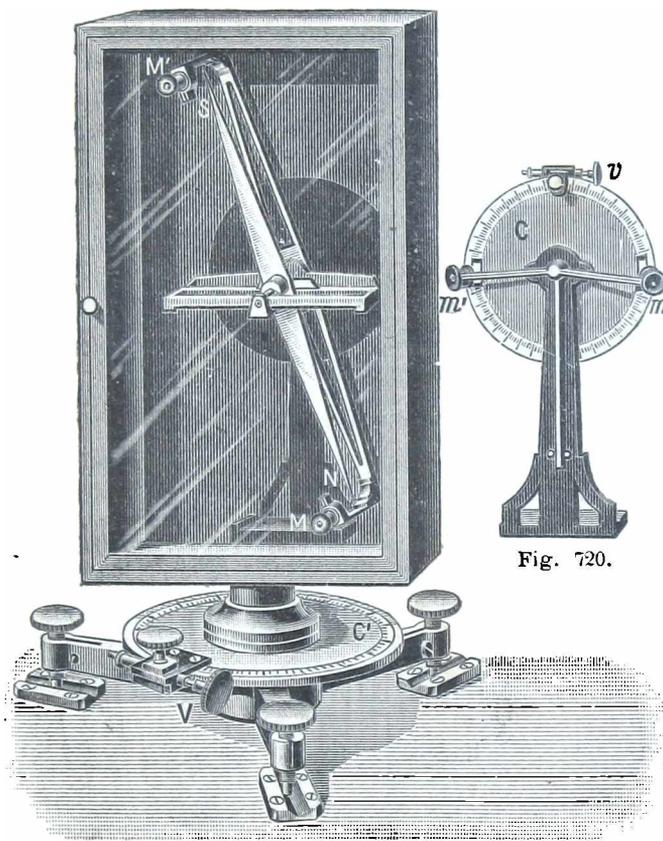


Fig. 719.

Fig. 720.

inverso, disminuye la inclinación. Se anula en un punto próximo al ecuador terrestre y, entonces, la aguja queda horizontal. De nuevo, vuelve a inclinarse en el hemisferio sur; pero, en este caso, el polo que queda debajo del horizonte es el polo sur. Esta inclinación aumenta en seguida y, en el polo sur magnético, se vuelve igual a 90° .

Llámanse *ecuador magnético* al lugar geométrico de los puntos en que la inclinación es nula. Este sigue irregularmente un gran círculo terrestre algo inclinado sobre el ecuador geográfico y que corta a este círculo en dos puntos. Además, varía al mismo tiempo que los polos magnéticos.

Con el nombre de *paralelo magnético*, se designa una línea en cuyos

puntos tiene valor constante la inclinación. Los paralelos magnéticos son aproximadamente círculos menores terrestres paralelos al ecuador magnético.

Variaciones con el tiempo. — En un mismo lugar, la inclinación varía de una época a otra. En 1671 era, en París, de 75°. Luego, ha ido disminuyendo. Actualmente, disminuye de 2' a 3' por año.

Método de Folgheraiter. — Folgheraiter ha indicado un método interesante para estudiar el valor de la inclinación en los tiempos más remotos. Ha demostrado que la arcilla ferruginosa, después de la cocción, conserva una imantación que sigue la dirección del campo magnético en que se ha cocido. Ha estudiado con vasos antiguos de barro cocido, y, de su forma y de la distribución de la imantación en su superficie, ha deducido el ángulo que debería formar con la vertical, la dirección del campo terrestre en el momento de la cocción. De esta manera, ha llegado a pensar que los vasos más antiguos fueron fabricados en una época en que la inclinación, en la Italia central, estaba en sentido inverso del que actualmente sigue. Por otra parte, tan sorprendente resultado no ha sido admitido por todos los físicos que estudian el magnetismo terrestre.

Investigaciones de Brühnes y David. — Aplicando el mismo método a arcillas volcánicas puede también tenerse indicaciones sobre la inclinación en épocas geológicas más o menos lejanas. Esto es lo que, particularmente, han verificado Brunhes y David, que han estudiado el ladrillo natural de ciertas regiones de Auvernia y han reconocido que, aunque en los bancos próximos, situados en el mismo torrente de lava, varía en grandes proporciones la intensidad de la imantación, la dirección de ésta permanece constante y es, en general, diferente de la dirección actual del campo terrestre.

712. *Causas del magnetismo terrestre.* — ¿A qué causas se debe el campo magnético terrestre? Gilbert emitió la hipótesis de que la tierra era asimilable a un imán, hipótesis que, actualmente, está abandonada. De todos modos, se puede atribuir una acción considerable a la imantación de ciertas rocas que constituyen el globo. Se pensó atribuir el origen del magnetismo terrestre a corrientes eléctricas que circulan alrededor de nuestro planeta. También se ha investigado esta causa en el sol. Más recientemente, se emitió la hipótesis de que el sol envía a la tierra ora rayos catódicos, ora ondas electromagnéticas capaces de producir o de modificar el campo magnético terrestre. Por otra parte, nada imposible sería que existieran ambas causas simultáneamente.

713. *Medida del momento magnético de un imán y de la componente horizontal del campo terrestre.* — Puede medirse, al mismo tiempo, el momento magnético \mathcal{M} de una barra imantada, y la componente horizontal H del campo terrestre. Para esto, mídese sucesivamente el producto y el cociente de estas dos magnitudes.

I. *Medida de $\mathcal{M}H$.* — Suspéndese la barra horizontalmente de un hilo sin torsión

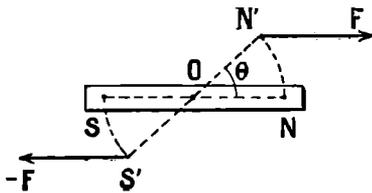


Fig. 721.

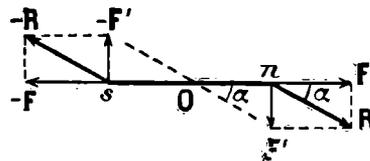


Fig. 722.

proyectado en O en el plano horizontal, que es el de la figura 721. Sepárasela de su posición de equilibrio y se la abandona a sí misma. Efectuará oscilaciones isócronas, por la influencia de las fuerzas F y $-F$.

Por tanto, esta barra es análoga a un péndulo compuesto. Si llamamos I a su momento de inercia, su duración de una oscilación es

$$t = \pi \sqrt{\frac{I}{\mathcal{M}H}} \quad \text{de donde} \quad \mathcal{M}H = \frac{\pi^2 I}{t^2}.$$

Basta, pues, medir t e I .

II. *Medida de la relación $\frac{\mathcal{M}}{H}$.* — *Método de Gauss.* — *Magnetómetro.* — Para medir la

relación $\frac{H}{H}$, se emplea el procedimiento de Gauss, que consiste en comparar el campo del imán con el campo terrestre. El aparato que con este objeto se usa denominase *magnetómetro*. Consta de una aguja magnética horizontal, suspendida de un hilo de seda, y en la que hay fijo un espejito cóncavo que permite medir, por el método de reflexión, las desviaciones que aquélla sufra.

Supongamos que la aguja está en equilibrio según *ns* (fig. 722), en el campo terrestre *H*, y supongamos también que, por cualquier medio, se crea un campo *H'*, en dirección perpendicular. Sea μ la masa magnética de los polos del imán pequeño.

El polo *n* se halla sometido a la vez a dos fuerzas de intensidades $F = \mu H$ y $F' = \mu H'$. Asimismo, el polo *s* está sometido a dos fuerzas de igual intensidad, pero de sentido opuesto. Compongamos, según *R* y $-R$, los dos sistemas de fuerza. La aguja se colocará evidentemente en equilibrio en la dirección de estas resultantes; por lo tanto girará un ángulo α . En el triángulo *RnF*, tenemos :

$$\text{tg. } \alpha = \frac{\mu H'}{\mu H} = \frac{H'}{H}.$$

1^{ra} Posición de Gauss. — Después de haber marcado la posición de equilibrio magnético del magnetómetro en el campo terrestre solo, coloquemos la barra imantada que se estudia *NS* (fig. 723, I) perpendicularmente al meridiano magnético del imán del magnetómetro, que está colocado en *m*. Procederemos de modo que la distancia *D* del imán al punto *m* sea muy grande respecto de la longitud $2l$ de la barra *NS*. Además podremos tomar las distancias *Nm* y *Sm*, por *D*.

Para saber cuál es, en *m*, la intensidad del campo creado por *NS*, supongamos en *m* un polo norte de masa magnética igual a la unidad. Por parte de las masas magnéticas *m* y $-m$ del imán *NS*, estará sometido a dos fuerzas *f*

y *f'* de intensidad $\frac{m}{D^2}$. La resultante de estas dos fuerzas es el campo *H'* creado por el imán *NS* en *m*.

Si llamamos ω al ángulo *mfH'*, dada la pequeñez de este ángulo, se puede tomar *mH'* por un arco de círculo descrito desde *f* como centro. Por lo tanto,

$$H' = f\omega = \frac{\omega m}{D^2}.$$

Pero, en el triángulo *mNS* tenemos :

$$\omega = \frac{2l}{D}, \quad \text{y, por consiguiente,} \quad H' = \frac{2lm}{D^2} = \frac{Ml}{D^2}.$$

La medida de la tangente de la desviación α que sufre el magnetómetro, nos dará, pues,

$$\text{tg. } \alpha = \frac{H'}{H} = \frac{Ml}{D^2 H}.$$

Conociendo *D* y *tg. α* se podrá deducir de ellas $\frac{Ml}{H}$. Del valor de MlH se deducirán simultáneamente *Ml* y *H*.

Finalmente, conociendo *H* y la inclinación *i* se puede deducir la componente vertical *V* del campo terrestre (que es igual a *H tg. i*) y la intensidad total del campo terrestre $F = \frac{H}{\cos i}$ (705).

2^a Posición de Gauss. — Para medir $\frac{M}{H}$, puede también colocarse el imán *NS* perpendicularmente al meridiano magnético; pero de manera que la prolongación de su dirección pase por *m* (fig. 723, II). Procuremos que la distancia del centro del imán al punto *m* sea, como antes, *D*. El polo *N* ejerce en la unidad de magnetismo, colocado en *m*, la fuerza $f = \frac{m}{(D-l)^2}$. El polo *S* ejerce la fuerza *f* de sentido contrario =

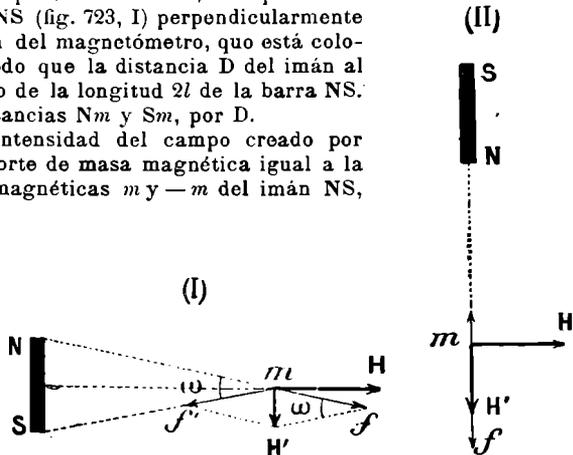


Fig. 723.

$\frac{m}{(D+l)^2}$, y la intensidad H' del campo ejercido por el imán NS es

$$H' = \frac{m}{(D-l)^2} - \frac{m}{(D+l)^2} = \frac{4 D m l}{D^2 - 2D^2l^2 + l^4}$$

Se pueden despreciar D^2l^2 y l^4 ante D^4 . Luego

$$H' = \frac{4ml}{D^3} = \frac{2H}{D^2}$$

Se ve que el campo del imán tiene doble valor del que tenía en la primera posición. Por consiguiente, la tangente de la desviación del magnetómetro tendrá el duplo de valor que tenía en el experimento anterior.

LIBRO IX

CORRIENTE ELÉCTRICA

CAPÍTULO I

FENÓMENOS GENERALES DE LA CORRIENTE ELÉCTRICA Y DE ELECTRIZACIÓN

CORRIENTE ELÉCTRICA

714. **Experimento fundamental.** — Se toma un vaso que contenga agua acidulada por ácido sulfúrico, en la cual se ponen dos láminas, una de cobre y la otra de cinc (fig. 724) y se reúnen ambas láminas con hilo metálico. Si se acerca este hilo a una aguja imantada en equilibrio sobre su eje, se ve que aquél la desvía de su posición de equilibrio.

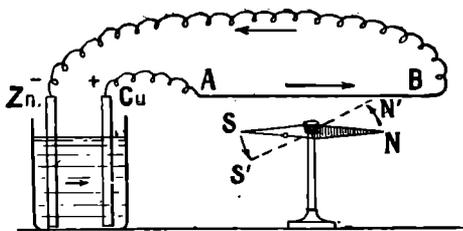


Fig. 724.

Por razones que luego veremos, se dice que entonces el hilo es el foco de una *corriente eléctrica*. De una manera general, se reconoce la existencia de una

corriente eléctrica en un hilo metálico, observando que desvía una aguja imantada de su posición de equilibrio. A más de esta acción fundamental, la corriente posee otras propiedades que después estudiaremos, especialmente la de ser capaz de imantar el hierro, la de desprender calor, etc.

715. **Diversos generadores de corrientes.** — **Polos.** — **Sentido de una corriente.** — El aparato formado por una lámina de cobre y otra de cinc, metidas en agua acidulada, es un *generador de corriente*. Constituye lo que se llama un *elemento de pila*. Más adelante (751) estudiaremos otros elementos de pila más perfectos. Un grupo de elementos reunidos de cierta manera constituye una *pila eléctrica* (718).

La pilas fueron los primeros generadores de corriente que se conocieron; pero no son los únicos. Para las grandes aplicaciones de la co-

riente (luz eléctrica, fuerza motriz), se emplean máquinas llamadas *dinamos* (850) para producirla.

También es frecuente reemplazar las pilas por los *acumuladores eléctricos* (745), que necesitan de las dinamos para volver a cargarlos.

La lámina de cobre y la de cinc del aparato precedente (714) constituyen los *polos* del elemento de pila. Todo generador de corriente tiene dos polos; y si se reúnen por un hilo metálico se obtiene una corriente en el hilo.

Sentido de una corriente. — Si se repite el experimento precedente, invirtiendo los polos donde están atados los extremos del hilo metálico

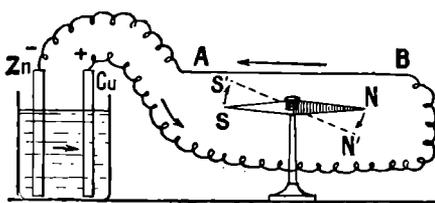


Fig. 725.

(fig. 725) se observa que la desviación de la aguja imantada cambia de sentido. Dícese entonces que la corriente tiene, en este caso, un sentido inverso del que tenía en el primer experimento.

También se dice que la corriente va, en el hilo metálico, del cobre al cinc: este sentido está señalado en las figuras 724 y 725.

El cobre, de donde parte la corriente, es el *polo positivo* del elemento de pila, mientras que el cinc es el *polo negativo*.

Los fenómenos que se producen en la pila misma (736) prueban que la corriente la atraviesa *del polo negativo al polo positivo* (fig. 726); entonces se dice que *la corriente recorre un circuito cerrado*.

Lo mismo ocurre en todos los generadores. Cada uno tiene un polo positivo y un polo negativo; cuando produce una corriente en un hilo exterior, esta corriente atraviesa el hilo del polo positivo al polo negativo, y atraviesa el generador mismo del polo negativo al positivo.

716. **Intensidad de una corriente eléctrica.** — **Cantidad de electricidad.** — Los efectos de una corriente eléctrica pueden ser más o menos intensos. Si se vuelve a repetir el experimento fundamental sin cambiar la posición del hilo AB, pero atando sus puntas a los polos de otro generador de corriente que el elemento de pila, se ve que, en general, la aguja se ha desviado *más o menos* que anteriormente: este fenómeno se expresa diciendo que la segunda corriente es *más o menos intensa* que la primera; además, los otros efectos de la corriente aumentarán o disminuirán al mismo tiempo.

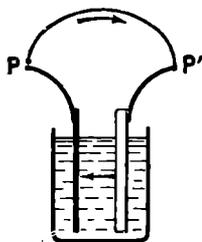


Fig. 726.

Galvanómetros. — Se construyen aparatos llamados *galvanómetros* (808), en los cuales se coloca el alambre conductor de la corriente de manera que su acción sobre la aguja sea todo lo grande posible. Así se puede descubrir la existencia de corrientes muy

poco intensas y medir su intensidad.

Amperio. — La intensidad de la corriente eléctrica se evalúa por medio de una unidad denominada *amperio* (731, 793).

Cantidad de electricidad. — *Culombio.* — Cuando se produce, por cierto tiempo, una corriente eléctrica, en un conductor, se conviene en decir que por este conductor pasa cierta *cantidad de electricidad* (732); evalúase por medio de una unidad llamada *culombio*.

717. **Cuerpos conductores y no conductores de la corriente eléctrica.** — **Aisladores.** — **Resistencia eléctrica.** — **Reóstatos.** — Según la naturaleza del cuerpo intermedio intercalado entre los dos polos de un elemento de pila, se observa que se producen o faltan los efectos de la corriente eléctrica : entonces, se dice que la corriente *pasa o no pasa* por el cuerpo intercalado : este cuerpo llámase, a su vez, *conductor o no conductor* de la corriente o de la electricidad.

El circuito de una pila se denomina *cerrado* si sólo comprende conductores : en este caso, la corriente pasa. Llámase *abierto* si, en uno o varios puntos, comprende sustancias no conductoras : en este caso no pasa la corriente.

Los cuerpos conductores son los metales y algunos otros cuerpos sólidos, como el carbón preparado a alta temperatura, la pirita de hierro, etc.; los *electrólitos* (ácidos, bases y sales disueltas en agua, y, en consecuencia, el agua común que es una solución ligeramente salina).

Los cuerpos no conductores son : los metaloides, como el azufre; las sustancias orgánicas que no son ni ácidos ni sales, como los carburos de hidrógeno, bencina, parafina; las resinas; las gomas, como el caucho y la gutapercha, etc.; el aire y otros gases, así como los vapores.

En realidad no hay cuerpos *absolutamente* no conductores. Además, para un mismo cuerpo, la conductibilidad eléctrica depende de su temperatura y de su estado físico. Así, el cristal, muy mal conductor en frío, es conductor, calentado al rojo.

Los cuerpos malos conductores intercalados entre los polos de una pila, no dejan pasar más que una corriente poco intensa : dícese que tienen *gran resistencia eléctrica* (763). Los cuerpos buenos conductores, en igualdad de condiciones, dejan pasar una corriente más intensa : dícese que tienen *poca resistencia eléctrica*.

Los conductores formados por una misma sustancia son tanto más resistentes cuanto más largos y finos son (764).

La resistencia de un conductor se expresa mediante una unidad especial llamada *ohmio* (763).

Aisladores. — Los cuerpos malos conductores se designan también con el nombre de *aisladores*; en efecto, se emplean para *aislar* los alambres o hilos conductores, en que pasa una corriente eléctrica, de modo que impidan a ésta el paso a través de los conductores a que puedan tocar los hilos. En las corrientes de pilas aislanse los hilos envolviéndolos en una cubierta de seda o algodón, o en un tubo de gutapercha. En la electricidad de potencial elevado (727) se obtienen buenos aisladores ya suspendiendo los hilos desnudos, de cordones de seda, ya colocándolos en parafina, caucho, ebonita*, etc. En ciertos

* La ebonita es caucho endurecido por incorporación de azufre.

aparatos, se aíslan también los conductores por medio de porcelana, mármol, pizarra, mica.

Reóstatos. — Cuando se necesita variar la intensidad de una corriente eléctrica, intercálase en el circuito alambres más o menos delgados, generalmente de maillechort o de hierro-níquel. Se efectúa

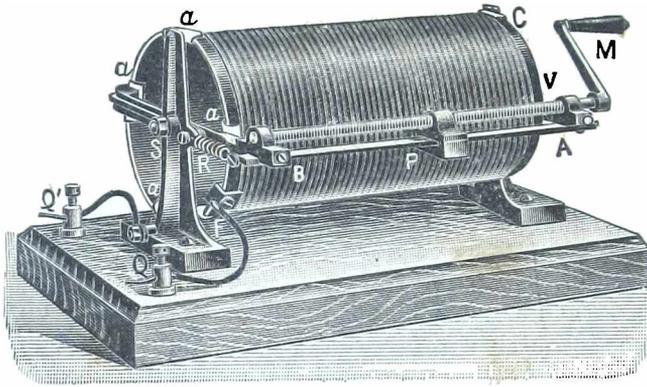


Fig. 727.

cómodamente por medio de aparatos llamados *reóstatos*, que sirven también para mantener *constante* la intensidad de una corriente a pesar de las causas exteriores de variación : de ahí, su nombre.

La figura 727 representa un tipo de reóstato. Está constituido por un alambre de hierro-níquel, enrollado en un cilindro aislador C. Uno de sus extremos está aislado, el otro, F, se pone en comunicación con los alambres del circuito por medio del borne Q. En las espiras del alambre, puede resbalar un contacto metálico P, sostenido por una barra de cobre que comunica por el resorte R, el soporte S y el borne Q' con el segundo alambre del circuito. El contacto se mueve mediante el tornillo V, movido, a su vez, por el manubrio M. Cuando el movimiento se efectúa de izquierda a derecha, aumenta la longitud del hilo de hierro-níquel intercalado en el circuito. De este modo se aumenta la resistencia del circuito. Para disminuirla se mueve el tornillo en el sentido inverso.

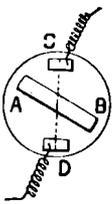


Fig. 728.

718. Interruptores y conmutadores. — Cuando se quiere pasar o interrumpir a voluntad la corriente, se emplean aparatos llamados *interruptores*. He aquí uno de los numerosos sistemas usados (fig. 728). Los hilos conductores de la corriente llegan hasta dos láminas de cobre C y D, fijas a una placa aisladora de porcelana. Por medio de un botón exterior, se hace girar otra lámina de cobre AB cuyos extremos van a parar a las láminas C y D; de esta manera se *establece* la comunicación. Para *cortarla*, basta dar vuelta al botón exterior, en sentido inverso.

En los timbres eléctricos (1021), apoyando un botón, establécese un contacto entre dos piezas metálicas que están en relación con los dos

hilos conductores : una de estas piezas se halla fija, la otra es una lámina resorte que se mueve de tal modo que al dejar de apoyar en el botón se rompe por sí sólo el contacto.

Finalmente, en los laboratorios, se emplea con frecuencia un interruptor muy sencillo constituido por un bloque de materia aisladora en que se fijan dos vasitos *a* y *b* (fig. 729), llenos de mercurio y en comunicación con los hilos del circuito. Colocando, entre *a* y *b*, un puente, formado por un alambre de doble curvatura, establécese la corriente: se interrumpe, quitando el puente.

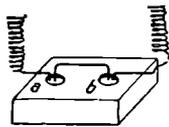


Fig. 729.

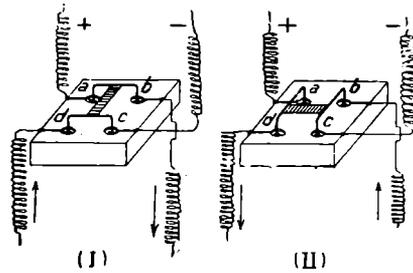


Fig. 730.

Conmutadores. — Para invertir el sentido de la corriente en un circuito, se emplea un *conmutador inversor*. Por ejemplo, se colocan cuatro vasitos de

mercurio, *a, b, c, d* (fig. 730) en un bloque de parafina, y se los pone opuestos; *ac* en comunicación con los polos de la pila; los otros, *b* y *d*, se instalan en el circuito por donde quiere hacerse pasar la corriente. Colocando en la posición (I) un sistema de dos puentes (que pueden hacerse solidarios uniéndolos por un vástago aislador), se establece la corriente en el sentido de las flechas; colocando el sistema a 90° (II), la corriente pasa en sentido inverso. En fin, interrumpe evidentemente la corriente cuando no se colocan los puentes. En este caso, el aparato constituye un interruptor llamado *bipolar* porque interrumpe la comunicación con los dos polos de la pila al mismo tiempo.

718. Pilas en tensión. — Se construye una *pila* propiamente dicha, asociando varios elementos.

La asociación puede hacerse en *tensión* o en *serie*, uniendo el polo negativo del primer elemento con el positivo del segundo, y así sucesivamente (fig. 731). Si se unen el polo positivo extremo *P* y el negativo extremo *P'* por un conductor, se constituye un circuito cerrado en donde

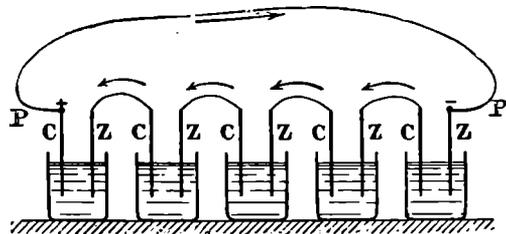


Fig. 731.

circula una corriente eléctrica de *P* a *P'*. Esta corriente circula también en los conductores *ZC* y en el interior de los elementos, verificándolo en el sentido de las flechas*.

* Se representa esquemáticamente un elemento de pila por dos trazos paralelos figurando los electrodos, y una pila en tensión por la yuxtaposición de estos esquemas (fig. 735).

720. **Pila de Volta.** — La primera pila fué inventada, en 1800, por el físico italiano Volta. Estaba constituida por una serie de discos dobles, de cobre y zinc soldados, *apilados* unos sobre otros, y separados unos de otros por ruedecitas de paño empapadas en agua acidulada (fig. 732). Este sistema realiza una pila de elementos asociados en tensión.

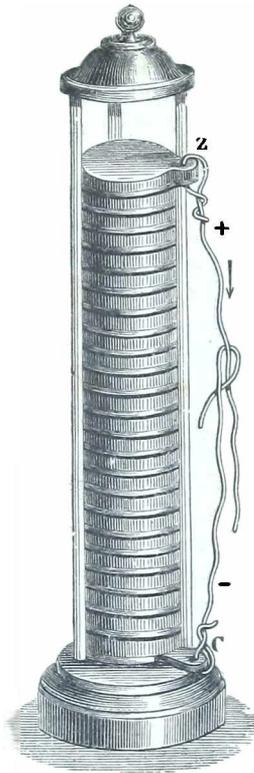


Fig. 732.

Uno de los principales inconvenientes de este aparato era que el líquido que impregnaba las ruedas se exprimía poco a poco por el peso de los discos, y que la resistencia eléctrica se hacía considerable. Por esta razón ha habido que adoptar la disposición indicada antes. A pesar de este perfeccionamiento, y por otras razones (751), la intensidad de la corriente que produce una pila de Volta disminuye rápidamente hasta casi anularse.

721. **Electrización.** — Las propiedades de la corriente eléctrica se relacionan con fenómenos conocidos más antiguamente, llamados *fenómenos de electrización*.

En la más remota antigüedad, habíase observado que ciertos cuerpos frotados atraían a los cuerpos ligeros. Tales son todos los aisladores, vidrio, ebonita, resina, etc.; frotados con una tela de lana muy seca, atraen, después, pequeños trozos de papel, barbas de plumas, bolas de médula de saúco, etc. Hace mucho tiempo que tal propiedad se expresa diciendo que aquellos cuerpos están *electrizados* o *cargados de electricidad**

Estas cargas se manifiestan fácilmente por medio del *péndulo eléctrico* (fig. 733), pequeño aparato formado por una bola de médula de saúco, suspendida a un hilo de lino conductor que está unido a una potencia metálica. De este modo, dicese que el péndulo está *en comunicación con el suelo*. También se constituyen péndulos eléctricos *aislados*, reemplazando el hilo de lino por uno de seda.

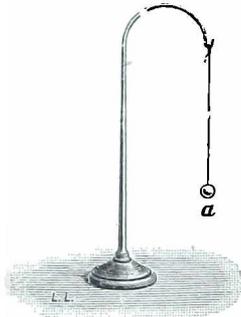


Fig. 733.

Si se acerca a un péndulo eléctrico un cuerpo electrizado, aquél es atraído.

722. **Electrización de los conductores por frotamiento.** — Si se tiene en la mano un conductor, no se le puede comunicar ninguna electrización por frotamiento, a causa de que el conductor se pone en comunicación con el suelo por medio del cuerpo, y de que, en estas condiciones, se descarga instantáneamente. Pero, si se le coloca en un pie aislador, de parafina, por ejemplo, y se le frota, o mejor aún, si se le pega con una

tela de lana o con piel de gato, se le comunica electrización.

* El primer experimento de este género se atribuye a Thales de Mileto (640 años a. de J. C.); fué efectuado con ámbar amarillo, resina fósil llamada, en griego, ἤλεκτρον (electrón): de donde salió la palabra *Electricidad*.

Diferencia entre los aisladores y los conductores. — Si se frota un punto cualquiera de un conductor, en todos sus puntos aparecerá la propiedad de atraer los cuerpos; este fenómeno se expresa diciendo que se esparce electricidad por todo el conductor; si se frota un cuerpo aislador, entonces, la propiedad de atraer los cuerpos queda, al contrario, localizada en la región frotada.

Comunicación de la electricidad por contacto. — Si un conductor no cargado toca a otro cargado, el primero adquiere propiedad eléctrica, porque atrae los cuerpos ligeros *. Además, el segundo los atrae con menos fuerza que antes del contacto. Luego éste ha perdido electricidad y aquél la ha ganado (887).

723. Acciones mutuas de los cuerpos electrizados. — Si acercamos a un péndulo aislado una barra de vidrio frotada, el péndulo es atraído y se acerca a la barra; pero en seguida es rechazado. Este mismo experimento se puede aplicar a todos los cuerpos electrizados.

Pero, carguemos un primer péndulo con una varilla de vidrio electrizada y otro con un trozo de ebonita electrizado también, y veremos que, mientras el vidrio rechaza al primer péndulo, atrae al segundo; la ebonita, al contrario, atrae al primero y rechaza al otro. De donde se deduce que el vidrio y la ebonita se electrizan de distinto modo. Si repetimos estos experimentos con un cuerpo cualquiera, electrizado por frotamiento o por otro método cualquiera, observaremos que actúa sobre los péndulos eléctricos ya como la ebonita, ya como el vidrio. Por consiguiente, no hay más que *dos modos de electrización*; dícese también que sólo hay *dos clases de electricidad*.

Llámase *electricidad positiva* a la desarrollada por frotamiento en el vidrio, y *electricidad negativa* a la de la resina o la ebonita.

De los experimentos precedentes, resulta la siguiente ley :

Dos cuerpos cargados de electricidad del mismo nombre se repelen;

Dos cuerpos cargados de electricidad de nombre contrario se atraen.

724. Electroscopio de panes de oro. — Esta ley se aplica a un aparato llamado *electroscopio de láminas de oro*, para determinar electrificaciones muy débiles (fig. 734). Consiste en una varilla metálica B a la cual se fijan, en su parte inferior, dos hojas de oro laminado muy ligeras. Dicha varilla pasa a través de un tapón de parafina que cierra una caja metálica con ventanillas de cristales que permiten ver los panes

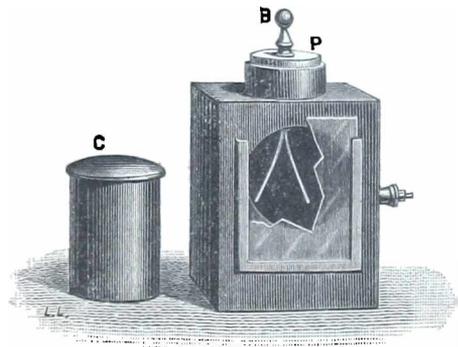


Fig. 734.

* Poco antes del contacto, prodúcese siempre entre los conductores una chispa eléctrica (900).

de oro. Se cubre el tapón, para preservar el aparato cuando no se utiliza. La menor electrización de los panes hace que se rechacen, divergiendo. Y aun basta acercar a B un cuerpo electrizado para que las hojas se separen : esto constituye un fenómeno de *influencia eléctrica* (893).

Para hacer ver la electrización de un *conductor*, puede también ponérsele en comunicación eléctrica con B, ya por contacto directo, ya por medio de un hilo metálico.

725. **Electrización por pilas.** — Lo mismo que el frotamiento, los polos de una pila imprimen cargas eléctricas a los cuerpos que están en comunicación *metálica* con ellos. Para comprobarlo, tomemos una pila de unos cincuenta elementos en tensión, por lo menos; pongamos en comunicación su polo negativo con la caja metálica de un electroscopio, y su polo positivo con la varilla del aparato : veremos que las hojas de oro divergen. Cortemos las comunicaciones y aproximemos despacio una varilla de vidrio frotada y observaremos que aumenta la divergencia de los panes. Esto demuestra (899) que el electroscopio estaba cargado positivamente.

Si, al contrario, ponemos el polo positivo de la pila en comunicación con la caja del electroscopio, y el negativo con su varilla, veremos que las hojas divergen también; pero, en este caso, una vez interrumpida la comunicación, si se acerca lentamente una varilla de vidrio frotado, disminuirá la divergencia de los panes. Lo cual indica que éstos se hallaban cargados negativamente (899).

Por lo tanto, si se hace comunicar los dos polos de una pila, respectivamente con dos conductores AB (fig. 735) aislados y no cargados primitivamente, el conductor A, que comunica con el polo positivo, se

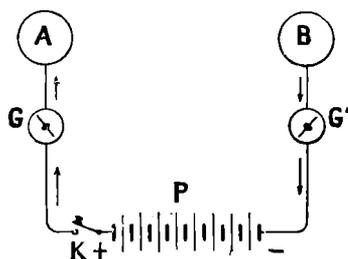


Fig. 735.

carga de electricidad positiva, mientras que el conductor B, que comunica con el polo negativo, se carga de electricidad negativa.

Además, se puede demostrar que cargando de este modo los conductores A y B, la pila *proporciona una corriente*.

En efecto, aislemos cuidadosamente la pila P (fig. 735) y unamos sus polos con los dos conductores A y B, aislados y descargados, intercalando entre los alambres conductores dos galvanómetros G y G' muy sensibles. Pongamos, además, en uno de los hilos, un interruptor K, para no establecer la comunicación sino en el momento deseado. Antes del experimento conviene poner A y B en comunicación con el suelo, solo un momento, para que no estén cargados de electricidad.

Tan pronto como se establece esta comunicación, los galvanómetros se desvían bruscamente e indican, por el sentido de su desviación, que, durante brevísimos instantes, ha pasado una corriente dirigida de B al polo negativo y del polo positivo a A. La magnitud de los ángulos de desviación permite determinar las cantidades de electricidad que

han recorrido los galvanómetros (811) : *estas cantidades son iguales* *.

Por lo tanto, hay que admitir que el cuerpo A gana cierta cantidad de electricidad, en tanto que B pierde una cantidad igual. Puesto que A está cargado positivamente, y B lo está negativamente, se deduce que *si un cuerpo B gana electricidad negativa, es lo mismo que si perdiera una cantidad igual de electricidad positiva.*

Téngase presente que también se puede decir que, en el experimento precedente, A ha perdido electricidad negativa, mientras que B la ha ganado: es decir que se ha producido una corriente eléctrica negativa yendo de A a B. Y hasta se puede suponer que estas dos corrientes inversas de electricidades de signos contrarios se han producido simultáneamente.

En las teorías modernas, ha habido quo suponer que cada átomo de un cuerpo en estado neutro está formado de un centro cargado positivamente, rodeado de corpúsculos negativos llamados *electrones* (965), siendo iguales en valor absoluto las cargas positiva y negativa. Bajo la influencia de una pila, los electrones, más movibles que los centros positivos, se ponen en movimiento en los conductores, en sentido inverso del que se atribuye a la corriente; los centros positivos también pueden ponerse en movimiento en el sentido de la corriente.

Según esta hipótesis, el conductor B del experimento anterior, recibiría un exceso de electrones y perdería centros positivos, lo cual explica su carga negativa, y el conductor A, habiendo perdido electrones y ganado centros positivos, conservaría un exceso de carga positiva.

726. Electricidad en movimiento y electricidad en equilibrio. — Electrodinámica. — Electroestática. — Vemos que se puede considerar a la corriente eléctrica como procedente del *movimiento de la electricidad*; mientras que, en los cuerpos A y B, cargados de electricidad, puede considerarse ésta como *en equilibrio*. Por esta razón, el estudio de la corriente eléctrica se denomina también *electricidad dinámica* o *electrodinámica* y el de las cargas eléctricas llámase *electricidad estática* o *electroestática*.

727. Analogías hidráulicas. — Diferencia de potenciales. — Supongamos una bomba rotativa P (fig. 736) cuyo orificio de aspiración, A, comunica, por un tubo, con el orificio R de repulsión. Si el conjunto está lleno de agua, al hacer girar la bomba se establecerá una corriente de agua. Este fenómeno es análogo al de la corriente eléctrica producida por una pila en un circuito cerrado.

Pero, si la bomba (fig. 737) comunica, por su tubo de aspiración, con un vaso B que contenga agua, y, por su tubo de repulsión, con un segundo vaso A, se ve que, al hacerla girar, el agua pasará simplemente de B y A, hasta que la diferencia de niveles entre estos vasos cree una presión hidrostática que equilibre la presión producida por la bomba : en este momento, el efecto de la bomba queda anulado, y el agua no pasa ya de B a A. Este fenómeno es análogo al fenómeno

* Para el buen resultado de este experimento, es preciso tener una pila de gran número de elementos, cuerpos AB de muy grandes dimensiones y galvanómetros de gran sensibilidad; porque sólo pasa una cantidad de electricidad sumamente pequeña. De todos modos, si los cuerpos A y B son platillos de gran superficie y están muy cercanos, es decir, si forman lo que llamaremos un *condensador* (936), la cantidad de electricidad es muy grande; en este caso, se la puede notar y medir fácilmente.

eléctrico observado al poner los polos de una pila en comunicación con dos conductores A y B (fig. 735).

Por analogía con el experimento hidráulico, diremos que si los polos

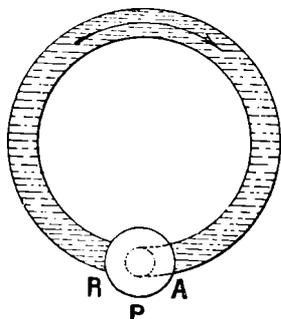


Fig. 736.

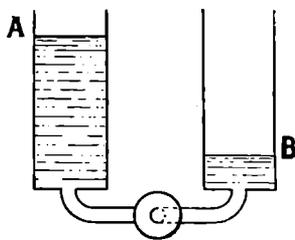


Fig. 737.

de una pila comunican con dos conductores aislados, estos conductores adquieren una cierta diferencia de nivel eléctrico.

Esta diferencia de nivel se llama también *diferencia de potenciales eléctricos*. Se expresa por medio de una unidad de diferencia de potenciales eléctricos llamada *voltio* (771).

CAPÍTULO II

ELECTRÓLISIS

728. **Caracteres generales de la electrólisis.** — *Definiciones.* — Los ácidos, las bases y las sales fundidos o disueltos en agua son conductores

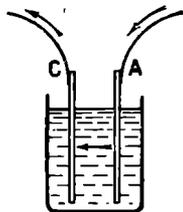


Fig. 738.

de la corriente eléctrica; pero no pueden dejarla pasar sin descomponerse. Estos cuerpos se denominan *electrólitos* y su descomposición por la corriente se llama *electrólisis*. Coloquemos uno de estos líquidos en un vaso, en el cual sumergiremos dos *electrodos* conductores A y C (fig. 738), unidos a los dos polos de un generador de corriente eléctrica: de este modo, pasará por el líquido una corriente eléctrica. El electrodo de entrada A (que comunica con el polo positivo del generador) recibe el nombre de *ánodo*; el de salida C (que está unido al polo negativo) se llama *cátodo*. El aparato se llama *voltímetro*. El fenómeno está caracterizado por dos hechos generales.

1º Se nota que los productos de la electrólisis sólo aparecen en la proximidad de los electrodos, y nunca en el intervalo que los separa en el seno de la masa líquida.

2º *La molécula química del electrólito se divide en dos partes que se desprenden respectivamente en los electrodos.*

Estas dos partes de la molécula se llaman *iones*. El ion del cátodo (catión) es el hidrógeno del electrólito, si éste es un ácido, o bien, el metal del electrólito, si éste es una base o una sal; el ion de un ánodo (anión) está constituido por el resto de la molécula, llamado el *radical del electrólito*.

Por ejemplo, el cloruro de sodio disuelto NaCl da un catión Na y un anión Cl.

Reacciones secundarias. — Esta sencillísima ley resulta a veces oscura por reacciones llamadas *secundarias*, que resultan, ya de la reacción de los iones en los electrólitos o en los electrodos, ya de la descomposición del anión. He aquí algunos ejemplos.

Agua acidulada. — Si se sumerge en agua ligeramente acidulada con ácido sulfúrico, dos electrodos de platino puestos en comunicación con los polos de una pila (de 2 elementos por lo menos), se ve que se desprenden burbujas de gas, que se pueden recoger en probetas. Para esto, puede constituirse cada electrodo por un tubo de vidrio encorvado (fig. 739) y cerrado en su parte inferior que está atravesada por un hilo de platino. Introdúcese mercurio en el fondo del tubo y se establece la comunicación con los polos del generador. Cuando pasa la corriente, se observa que en el ánodo hay desprendimiento de oxígeno y, en el cátodo, de hidrógeno: este último tiene doble volumen que el otro.

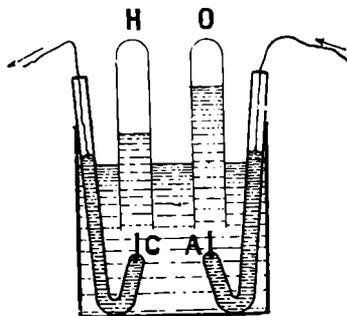


Fig. 739.

El agua parece, por tanto, haberse descompuesto en sus dos elementos. Pero el agua pura no es conductora, y por lo tanto no se descompone por la corriente. Para explicar la descomposición del agua acidulada, se admite que el ácido $\text{SO}^4 \text{H}^2$ se ha descompuesto en dos iones: H^2 , se desprende en el cátodo, SO^4 en el ánodo. Como este último ion no puede existir en estado libre, reacciona sobre el agua para producir ácido sulfúrico y oxígeno*. Luego el ácido sulfúrico descompuesto ha sido regenerado.

Sosa o potasa. — Si se electróliza una solución de sosa NaOH, o de potasa KOH, con electrodos inatacables, se desprende también oxígeno en el ánodo e hidrógeno en el cátodo. Hay que admitir que el metal depositado en el cátodo descompone el agua, desprendiendo el hidrógeno de ella y regenerando el álcali, mientras que, en el ánodo, el ion OH da agua y oxígeno**.

* Según la ecuación química, $\text{SO}^4 + \text{H}^2\text{O} = \text{SO}^4\text{H}^2 + \text{O}$.

** 2NaOH dan así:

en el cátodo $2\text{Na} + 2\text{H}^2\text{O} = 2\text{NaOH} + \text{H}^2$; y, en el ánodo, $2\text{OH} = \text{H}^2\text{O} + \text{O}$.

OBSERVACIÓN. — Es difícil saber si el agua absolutamente pura es o no es conductora y electrolizable, porque es imposible eximirla de toda huella de electrolitos disueltos. El agua pura tiene una conductibilidad completamente despreciable. El agua común, que contiene, en pequeña cantidad, sales disueltas, es conductora y se descompone por la corriente.

729. Electrólisis de las sales. — 1^{er} caso : *El metal no es atacado por el electrolito.* — *Ejemplo : sulfato de cobre.*

La electrólisis del sulfato de cobre SO_4Cu disuelto en agua da : en el

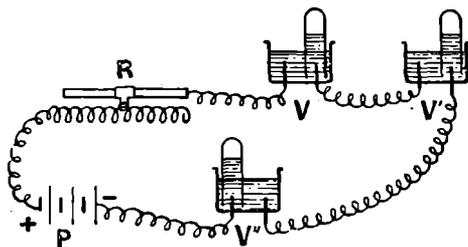


Fig. 740.

cátodo el cobre Cu que forma un depósito rojo : en el ánodo, el ion SO_4 . Si este ánodo es de platino, o de materia inatacable por el ion SO_4 , éste último actúa sobre el agua para dar ácido sulfúrico y oxígeno (fig. 728). Si el ánodo es de cobre, el ion SO_4 se combina inmediatamente para regenerar el sulfato descompuesto.

Entonces parece que todo se ha reducido a un transporte de cobre del ánodo que se disuelve, al cátodo que aumenta de peso.

De manera general, siempre que se electroliza una solución de una sal de un metal, tomando como ánodo una lámina de ese metal, ésta se disuelve, mientras que en el cátodo aparece una cantidad del metal igual a la que se ha disuelto.

2^o caso : *El metal es atacable por el electrolito.* — *Sales alcalinas.* — *Ejemplo : cloruro de sodio disuelto.* — La sal da : en el cátodo, sodio Na que, reaccionando sobre el agua, da sosa NaOH e hidrógeno; en el ánodo, cloro Cl .

Si los aparatos están dispuestos de modo que separen inmediatamente el cloro de la sosa, se preparan así estos dos cuerpos. Pero si se deja al cloro accionar sobre la sosa, se origina agua de Javel (hipoclorito de sodio).

730. Experimentos cuantitativos. — Si se hace atravesar por la corriente de una misma pila P (fig. 740), voltímetros V, V', V'' que con; tengan soluciones de ácidos o de bases, se observan los fenómenos siguientes :

1^o *La masa de hidrógeno recogida en cada voltámetro es la misma en el mismo tiempo, sean cuales fueren la materia y la distancia de los electrodos, así como la proporción y la naturaleza del ácido o de la base.*

2^o *La masa de hidrógeno recogida es proporcional al tiempo durante el cual ha pasado la corriente.*

Esta última ley no se puede verificar sino cuando la intensidad de la corriente permanece constante, de lo cual debe cerciorarse intercalando un galvanómetro (808) en el circuito.

731. Definición precisa de la intensidad de una corriente. —

Amperio. — Las leyes de la electrólisis nos permiten definir de modo preciso la intensidad de una corriente.

Si, en el circuito de una pila, se colocan uno o varios voltímetros y un reóstato (fig. 740), y si se disminuye la resistencia de éste, lo cual aumenta la intensidad de la corriente, se observa que la cantidad de hidrógeno desprendida en un tiempo dado aumenta al mismo tiempo. Esta cantidad de hidrógeno puede pues medir la intensidad de la corriente.

Entonces se enuncia la ley siguiente :

La intensidad de una corriente es proporcional a la masa de hidrógeno que desprende, en tiempo dado.

Si, por ejemplo, en dos experimentos consecutivos, la cantidad de hidrógeno desprendida ha sido la misma, diremos que la intensidad de la corriente es también la misma; si, en el segundo experimento, la cantidad desprendida de hidrógeno es 2, 3, 4 veces mayor que en el primero, la intensidad de la corriente habrá sido 2, 3, 4 veces más grande.

La ley anterior (730, 1º) tiene, pues, la importante consecuencia que sigue :

La intensidad de una corriente es igual en todos los puntos del circuito que recorre.

Amperio. — Se ha tomado (793) una unidad práctica de intensidad de corriente, denominada *amperio* : ésta es la intensidad de una corriente que desprende 0^{gr},0000 1035 (o $\frac{1}{96\ 600}$) de hidrógeno por segundo.

732. Cantidad de electricidad. — Culombio. — Cuando una corriente de 1 amperio circula durante un segundo en un conductor, dícese que *suministra una cantidad de electricidad igual a 1 culombio*. El culombio es la *unidad práctica* de medida de las cantidades de electricidad.

Cuando una corriente de i amperios circula durante t segundos en un circuito, éste es atravesado por una cantidad de electricidad q , igual a it culombios ($q = it$),

Ya que la cantidad de hidrógeno desprendida por una corriente es, a la vez, proporcional al tiempo durante el cual pasa la corriente y a la intensidad de ésta, se deduce que :

La cantidad de hidrógeno desprendida en un voltímetro depende únicamente de la cantidad de electricidad que ha circulado.

Y se puede decir que el culombio es *la cantidad de electricidad que deja en libertad 0,0000 1035 g. de hidrógeno*. En consecuencia, se necesitan 96 600 culombios para desprender 1 gramo de hidrógeno.

733. Ley de Faraday. — Equivalentes electroquímicos. — La siguiente ley, descubierta por Faraday, precisa la relación que existe entre la masa de un electrólito descompuesto por una corriente dada, en un tiempo dado, y la naturaleza química del electrólito.

En un electrólito dado hay que definir primero la *valencia* de su radical.

En un *ácido*, la valencia del radical es el número de átomos de hidró-

geno que están unidos al radical en la fórmula del ácido. (Así, en ClH y AzO^3H los radicales Cl y AzO^3 son monovalentes; en SO^4H^2 , el radical SO^4 es divalente.)

En una *sal*, la valencia del radical es el número de átomos de hidrógeno por el cual hay que reemplazar el metal en la fórmula de la sal, para tener la fórmula del ácido. Así, en AzO^3Na el radical es monovalente; divalente en SO^4Fe ; trivalente en $(\text{SO}^4)^3\text{Fe}$, etc.

En una *base*, siendo monovalente el oxhidrilo, la valencia del radical es igual al número de oxhidrilos.

LEY. — *La cantidad de electricidad que deja en libertad un peso atómico de hidrógeno, descompone una masa de un electrólito cualquiera, correspondiente a una valencia de su radical.*

Dícese que esta cantidad de electricidad *rompe una valencia*.

Los pesos atómicos se expresan generalmente en gramos. Entonces la *cantidad de electricidad capaz de romper una valencia es de 96 600 culombios*.

Equivalentes electroquímicos. — Llámanse *equivalente electroquímico* de un ion cualquiera la masa del ion desprendida por la cantidad de electricidad, 96 600 culombios, que desprende 1 gramo de hidrógeno.

Cuando el ion es un cuerpo simple, el equivalente electroquímico es, según la ley precedente, igual al peso atómico del ion, dividido por su valencia.

ESTUDIO EXPERIMENTAL. — Se pueden repetir experimentos análogos a los de Faraday disponiendo en un mismo circuito un voltámetro de agua acidulada, después otros voltámetros de nitrato de plata AzO^3Ag (la plata es monovalente; su peso atómico es 108), de sulfato de cobre SO^4Cu (el cobre es divalente y su peso atómico es 63), etc. Obsérvese que si la corriente se prolonga bastante tiempo para desprender 1 gramo de hidrógeno, se han depositado 108 gramos de plata, 31,5 g. $\left(= \frac{63}{2}\right)$ de cobre, etc., lo cual prueba la ley de Faraday.

En resumen :

Se ve que 96 600 culombios dejan en libertad : 1 g. de hidrógeno, 108 g. de plata; $\frac{1}{2}$ 63 g. de cobre, etc. Del mismo modo, un culombio

deja en libertad : $\frac{1}{96\,600} = 0,0000\,1035$ g. de hidrógeno; $0,0000\,1035 \times 108 = 0,001118$ g. de plata y $0,0000\,1035 \times 31,5 = 0,00033$ de cobre, etc.

734. **Medida electrolítica de la intensidad de una corriente.** — La masa de plata desprendida por una corriente en un tiempo dado es más fácil de determinar que la masa correspondiente de hidrógeno y permite también determinar la intensidad de la corriente. Para medir esta intensidad, se puede, también, intercalar, en el circuito de la corriente, un voltámetro de nitrato de plata. Determinase la masa de plata depositada en un tiempo dado. Si en t segundos se han depositado m gr. de plata, hay que deducir que han pasado $\frac{m}{0,001118}$ culombios.

Se tiene, pues, $it = \frac{m}{0,001118}$, de donde $i = \frac{m}{0,001118.t}$.

OBSERVACIÓN. — Si la corriente no hubiera conservado intensidad constante durante el tiempo del experimento, este cálculo daría la *intensidad media*.

735. **Teoría de la electrólisis. — Transporte de los iones.** — Para explicar las leyes cualitativas y cuantitativas de la electrólisis, Arrhenius emitió la hipótesis siguiente : Cuando un electrólito está disuelto o fundido, se halla ya, — cuando menos, en parte, — descompuesto en sus iones. Si, por ejemplo, se disuelve cloruro de sodio NaCl, la solución contendrá, aparte de las moléculas NaCl que quedan enteras, iones Na y Cl separados. Ya hemos visto la conformidad de esta hipótesis con ciertas propiedades de las soluciones (336, 338, 339). Además se admite que los iones están cargados, los cationes positivamente y los aniones, negativamente, y que cada ion monovalente evaluado en gramos (por ejemplo, 23 gramos de sodio o 35.5 g. de cloro) lleva 96 600 culombios, mientras que un ion divalente contiene una carga dos veces más grande, etc. Si en tal solución, se introducen dos electrodos que comuniquen con los polos de un generador de corriente, los iones cargados positivamente (cationes Na, por ejemplo) serán rechazados por el ánodo y atraídos por el cátodo (fig. 741); por lo tanto, se moverán en el sentido de la corriente; mientras que los iones negativos (aniones) serán, al contrario, rechazados por el cátodo y atraídos por el ánodo y se moverán en sentido inverso al de la corriente. Los iones, al llegar al contacto de los electrodos, desprenden al mismo tiempo que se descargan. Se ve que, por cada ion monovalente desprendido en cada electrodo, pasarán, de un electrodo a otro, 96 600 culombios positivos.

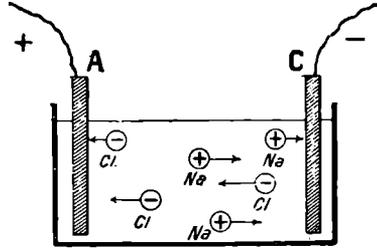


Fig. 741.

Transporte de los iones. — Durante la electrólisis, no permanece igual la concentración de los electrólitos alrededor de los electrodos. Hittorf explicó este fenómeno suponiendo que los iones positivos y los negativos no se mueven con igual velocidad.

CAPÍTULO III

FUERZA ELECTROMOTRIZ. — POLARIZACIÓN DE LOS ELECTRODOS. — ACUMULADORES. PILAS IMPOLARIZABLES. — PILAS TERMOELÉCTRICAS

736. **Energía producida por una corriente.** — En la mayoría de los efectos de la corriente eléctrica se ve aparecer energía en formas diversas : calor desprendido en los conductores, trabajo producido exteriormente si se hace pasar la corriente a un motor eléctrico, y, en fin, energía química comunicada a los electrólitos durante la electrólisis. En efecto, cuando una corriente circula en un voltámetro, de agua acidulada, por ejemplo, provoca la descomposición de cierta cantidad de agua. El agua, al formarse partiendo del oxígeno y del hidrógeno, desprende una cantidad notable de calor*; por lo tanto, para descom-

* 3 800 calorías próximamente por gramo, lo que equivale a una energía de 16 000 julios.

ponerla, es preciso que la corriente eléctrica le *restituya* esta energía. ¿Dónde toma la corriente de una pila la energía que desprende en estos diversos fenómenos?

Consideremos un elemento de pila de Volta, que produce una corriente (fig. 726). Es un vaso de electrólisis en que el cátodo es el cobre y el ánodo, el zinc. La corriente descompone el ácido; H^2 se desprende en el cobre; SO^4 , en el zinc y forma sulfato de zinc SO^4Zn , y sabemos que este conjunto de reacciones desprende energía: esta energía es la que aparece en los fenómenos que la corriente origina.

OBSERVACIONES. — 1º El ácido sulfúrico no ataca al zinc *puro* aislado; pero éste es atacado cuando se forma un elemento de pila con una lámina de zinc puro y una lámina de cobre y se cierra el circuito. En este caso, el hidrógeno se desprende sobre el cobre. De este modo se puede determinar la acción del zinc puro tocándolo simplemente por medio de un alambre de cobre o de platino.

El zinc ordinario, en cambio, es fuertemente atacado por el ácido sulfúrico diluido. Esto se debe a que aquél contiene metales extraños, principalmente plomo que desempeñan el papel del cobre del elemento Volta y que determinan pequeños elementos locales que indican el desprendimiento de hidrógeno.

También se ha descubierto que el zinc, después de amalgamado por inmersión en mercurio, posee la misma propiedad que el zinc puro: se le emplea con preferencia a éste, a causa de su precio más reducido.

2º La energía puesta en libertad por las reacciones que se verifican en la pila no es siempre exactamente igual a la que la pila proporciona a la corriente. Helmholtz ha demostrado que ciertas pilas dan a la corriente menos energía que la producida por la reacción química. El exceso de energía se encuentra en forma de calor desprendido en la pila, a más del que desprende la misma corriente (761). Otras pilas, al contrario, dan a la corriente más energía que la producida por la reacción química; la diferencia la suministran los cuerpos que constituyen la pila. En condiciones convenientes, estas pilas pueden enfriarse funcionando.

3º En todos los generadores de corriente distintos de las pilas, la energía se consume por el funcionamiento del aparato, y una parte, al menos, de esta energía se encuentra en los efectos de la corriente. Por eso, se dice que *todo generador proporciona energía a la corriente*.

737. **Fuerza electromotriz de un generador.** — **Voltio.** — La energía que el generador produce a la corriente es causa del entretenimiento de ésta. Estudiando todas las clases de generadores, se reconoce que en todos los casos es proporcional a la cantidad de electricidad que desarrolla la corriente producida. Por ejemplo, en una pila, la energía producida es evidentemente proporcional a la masa de los cuerpos que entran en reacción y, según las leyes de la electrólisis, esta masa es proporcional al número de culombios suministrados por la corriente.

La cualidad a consecuencia de la cual un generador entretiene una corriente se denomina su *fuerza electromotriz*.

La unidad de fuerza electromotriz, a la que se ha dado el nombre de *voltio*, es la fuerza electromotriz de un generador que proporciona a la corriente una energía de un julio por el paso de un culombio.

La fuerza electromotriz de un generador está, pues, medida en voltios por el número de julios que proporciona a la corriente para el paso de 1 culombio. Esta definición se aplica a todos los generadores de corriente, por ejemplo, a las dinamos.

738. Energía suministrada por un generador de corriente. — Si un generador de corriente, que tenga una fuerza electromotriz de e voltios, ha producido una corriente de i amperios, durante t segundos, ha suministrado it culombios, y, como da a la corriente e julios por culombio, le ha comunicado una cantidad de energía

$$E = eit \text{ julios.}$$

Potencia del generador. — La potencia del generador es la cantidad de energía que éste proporciona a la corriente en un segundo. Esta energía es evidentemente ei julios. La potencia del generador expresada en vatios (92) es, pues,

$$W = ei \text{ vatios.}$$

Vatio-hora y sus múltiplos. — En la industria eléctrica no se emplea el julio como unidad de energía, sino el *vatio-hora*. Un vatio-hora es la energía proporcionada por una máquina, de 1 vatio en una hora (o 3 600 segundos). Vale, pues, 3 600 julios. Se emplean sobre todo sus múltiplos por 100 y por 1 000, el *hectovatio-hora* y el *kilovatio-hora*. El mismo julio puede llamarse *vatio-segundo*.

739. Analogías hidráulicas. — Cuando en un depósito de agua, cerrado por sí mismo, se intercala una bomba que extraiga el agua de un lado y la lleve a otro (fig. 736), se establece circulación de agua. A consecuencia del frotamiento del agua en las paredes, será preciso, para entretenir la circulación, que la bomba, movida por un motor, comunique energía al agua. Esta energía se transformará en el calor resultante del frotamiento. Estas consideraciones completan la analogía hidráulica que ya hemos expuesto (727).

Además, si se intercala una turbina en la corriente de agua, se podrá recoger parte del trabajo que la bomba había comunicado; del mismo modo que se puede recoger parte de la energía de un generador, haciendo actuar un motor eléctrico por la corriente que produce.

740. Cálculo de la fuerza electromotriz de una pila. — Si la energía química de las reacciones que se verifican en una pila fuese completamente transformada en energía eléctrica y no se añadiera ninguna otra energía, se calcularía fácilmente la fuerza electromotriz de una pila, conociendo las reacciones que en ella ocurren y los calores de formación de los cuerpos que entran en juego. Bastaría determinar la masa de cada cuerpo que destruye o que forma un culombio. Efectuariase la diferencia entre el calor total de formación de los cuerpos que se producen y el calor total de formación de los cuerpos que se destruyen. Esta diferencia, evaluada en julios, daría la fuerza electromotriz de la pila. El cálculo, así efectuado, no conduce generalmente sino a un valor próximo a la fuerza electromotriz real, medida como veremos más adelante (786, 849).

La fuerza electromotriz de una pila es, en general, variable con la temperatura; pero esta variación es siempre muy poqueña. Helmholtz ha demostrado que si la fuerza

electromotriz de una pila aumenta con la temperatura, proporciona a la corriente una cantidad de energía mayor que la energía química desprendida por las reacciones de la pila. Ocurre lo contrario cuando la fuerza electromotriz disminuye al aumentar la temperatura.

741. Fuerza electromotriz de una pila en tensión. — Si se asocian en tensión varios elementos de una pila, cuando un culombio atraviese todo el sistema, se desprende, en cada elemento, una cantidad de energía igual a la fuerza electromotriz.

Como la fuerza electromotriz de la pila total está medida por la cantidad total de energía que ha sido puesta en libertad, se deduce que *la fuerza electromotriz de una pila en tensión es igual a la suma de las fuerzas electromotrices de sus elementos.*

Este resultado se aplica a todos los generadores de corriente que pueden, todos, como las pilas, asociarse en tensión.

POLARIZACIÓN DE LOS ELECTRODOS

742. Experimento fundamental. — Supongamos que, por medio de electrodos de platino, se electroliza agua acidulada. Hagamos pasar la corriente durante cierto tiempo, y luego suprimamos la pila. Si, después, unimos los dos electrodos a un galvanómetro, se observa que se produce una corriente de sentido inverso al que se había hecho circular por el voltámetro. Llámase *corriente secundaria*, por oposición a la corriente inicial que se denomina *corriente primaria*.

Este fenómeno recibe el nombre de *polarización de los electrodos*. Ha sido aplicado a los acumuladores (745).

Se debe a que las láminas de platino absorben respectivamente el hidrógeno y el oxígeno y a que, de este modo, su sistema forma una verdadera pila. Además, esta corriente secundaria actúa en sentido inverso y vuelve las cosas a su estado primitivo. Suministraría la misma cantidad de electricidad que la corriente primaria si no se perdiera ninguna burbuja de gas.

Este fenómeno no es especial de la electrólisis del agua acidulada; pues se puede repetir este experimento con un voltámetro que contenga un electrólito cualquiera.

743. Fuerza electromotriz de polarización. — Si un generador de corriente está unido a los electrodos de un voltámetro, éste funciona como una pila de fuerza electromotriz opuesta a la pila principal, porque absorbe energía en vez de proporcionarla. Dicese que es una fuerza *contraelectromotriz*. Se mide por el número de julios absorbidos durante el paso de un culombio. *Todo sucede como si se tuviera, en el circuito, una pila cuya fuerza electromotriz fuese la diferencia entre la de la pila primaria y la de la pila secundaria.*

Consecuencia. — En caso que la energía absorbida por la electrólisis durante el paso de un culombio fuese superior a la fuerza electromotriz de la pila, es evidente que ésta no podría producir la electrólisis,

porque 1 culombio desprendería, en esta descomposición, más energía que la absorbida en la pila. Por esta razón un solo elemento de Volta no puede producir todas la electrólisis; a veces, hacen falta, cuando menos, dos elementos en tensión.

744. Polarización de los electrodos por una fuerza electromotriz insuficiente para producir la electrólisis. — Pongamos en comunicación los electrodos de un voltámetro con los polos de una pila de fuerza electromotriz insuficiente para producir la electrólisis: intercalando en el circuito un galvanómetro. En el momento en que se establezca la comunicación, se verá que el galvanómetro se desvía, indicando el paso de una corriente, que se debilita con gran rapidez y que, al cabo de algunas centésimas de segundo, conserva un valor muy reducido. Se dice, también, que se han polarizado los electrodos. Además, si se suprime la pila y si se ponen los electrodos en comunicación, conservando al mismo tiempo el galvanómetro en el circuito, se ve que éste se desvía en sentido inverso al de la primera vez.

Algunos se han preguntado si este fenómeno consiste en una simple carga eléctrica de los electrodos, y en esto caso el vaso electrolítico sería análogo a un condensador (936), o bien si va acompañado de reacciones químicas de muy corta duración, que ponen en juego cantidades de materia demasiado débiles para que pueda determinarlas el análisis químico, o, también, si no coexisten estos dos efectos. Entre los numerosos trabajos relacionados con este problema, citaremos las investigaciones de Rothé que, por medio de un oscilógrafo (857), ha estudiado la ley de variación de la intensidad de la corriente de polarización de un voltámetro. De sus investigaciones, deduce que, en las pequeñas fuerzas electromotrices, los iones se depositan en los electrodos, y, por otra parte, y de acuerdo con Berthelot y Bouty, que, antes de la electrólisis visible, pueden formarse en los electrodos verdaderos productos químicos.

ACUMULADORES

745. Principio de los acumuladores eléctricos. — Los acumuladores eléctricos fueron inventados por Gaston Planté.

Quando se repite el experimento de polarización de los electrodos (742) reemplazando los electrodos de platino por láminas de plomo, se ve que la corriente secundaria es más intensa y dura más tiempo. Se dice que el voltámetro de electrodos de plomo tiene una *capacidad* mayor que el voltámetro de electrodos de platino, porque puede restituir mayor cantidad de electricidad. Planté ha demostrado que se aumenta esta capacidad formando convenientemente la pila secundaria, que consiste en hacer pasar varias veces seguidas la corriente primaria, alternativamente en un sentido y en sentido inverso. Siempre que una lámina de plomo es ánodo, el oxígeno que se desprende sobre él lo oxida superficialmente; el hidrógeno reduce en seguida el óxido cuando pasa la corriente en sentido inverso. De aquí resulta que la superficie de las láminas de plomo se ha vuelto esponjosa y que puede *acumular* los productos de las electrólisis en mayor cantidad. El procedimiento de formación de Planté está ahora en desuso y ha sido reemplazado por otro más rápido y eficaz, imaginado por Fauré y perfeccionado por Volckmar y Sellon.

746. Disposición y teoría de los acumuladores modernos. — Las láminas de un acumulador moderno son de plomo con aleación de antimonio, que es más duro que el plomo puro, y están alveoladas en varias formas (según los constructores) y los alveolos contienen una

pasta de óxido de plomo y agua acidulada. Este óxido es de *litargirio* PbO , para las placas llamadas *negativas* y que forman el polo negativo del acumulador, y de *minio* Pb^3O^4 para la *positivas*, que forman el polo positivo.

. *Formación del acumulador* *. — Se reúne la placa positiva P (fig. 742, I) al polo positivo de un generador de corriente (dinamo) y la negativa N

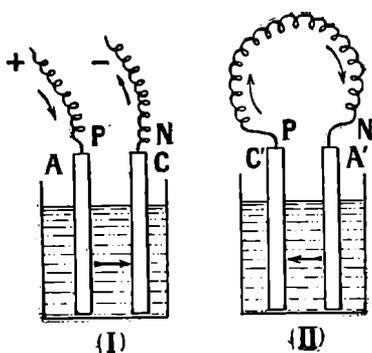


Fig. 742.

al polo negativo. Siendo la positiva P el ánodo A y la negativa el cátodo C, pasa una corriente primaria: el agua acidulada se descompone; el ion SO^4 desprendido en el cátodo, actúa sobre el agua y da oxígeno ($SO^4 + H^2O = SO^4H^2 + O$) que transforma el minio en *peróxido de plomo* PbO^2 ($Pb^3O^4 + 2O = 3PbO^2$); el hidrógeno H^2 desprendido en el cátodo reduce el litargirio con formación de plomo, esponjoso y cristalino ($PbO + H^2 = H^2O + Pb$). Al terminar esta operación, no produciendo ya

ninguna reacción los gases dados por la electrólisis, se desprenden con abundancia, y de este modo se conoce que la formación ha terminado. La lámina positiva aparece entonces con el color rojo del peróxido, y la negativa con el color gris del plomo.

. *Descarga del acumulador*. — Se descarga el acumulador reuniendo las láminas P y N por un circuito (fig. 742, II) que comprenda los aparatos a los cuales se quiere hacer pasar la corriente secundaria. Esta se forma en sentido inverso de la corriente primaria, de modo que la positiva P se vuelve cátodo C' (polo positivo de la pila secundaria), mientras que la negativa se vuelve ánodo A' (polo negativo de la pila secundaria). El ácido sulfúrico se electroliza: el ion SO^4 desprendido en el ánodo A' transforma el plomo esponjoso en sulfato de plomo SO^4Pb ; el hidrógeno H^2 desprendido en el cátodo C' reduce ante todo el bióxido de plomo PbO^2 , en protóxido PbO , que es transformado por el ácido sulfúrico en sulfato ($PbO^2 + H^2 + SO^4H^2 = SO^4Pb + 2H^2O$).

La descarga sería completa y la corriente secundaria cesaría si la *materia activa* de las dos láminas se transformara enteramente en sulfato de plomo.

. *Cargas y descargas sucesivas*. — Para volver a cargar el acumulador, se restablecen las comunicaciones de las láminas con los polos de un generador, lo mismo que para la formación. El ion SO^4 desprendido en el ánodo P (fig. 742, I), actúa sobre el agua y da oxígeno, que transforma el sulfato de plomo en peróxido ($SO^4Pb + O + H^2O = SO^4H^2 + PbO^2$). Al mismo tiempo, el hidrógeno H^2 reduce el sulfato de plomo del cátodo

* Para explicar la teoría del funcionamiento de un acumulador, supondremos que sólo posee una positiva P y una negativa N (fig. 742), colocadas en un vaso que contenga agua acidulada con ácido sulfúrico.

N al estado de plomo ($H^2 + SO^4Pb = SO^4H^2 + Pb$). La carga vuelve, pues, los electrodos al estado en que estaban después de la formación. Se conoce el fin de la carga en el abundante desprendimiento de gas en los electrodos.

Estas cargas y descargas del acumulador se pueden repetir sucesivamente.

747. **Acumuladores usuales.** — En la mayoría de los acumuladores (fig. 743) cada cubo contiene varias láminas positivas, soldadas todas juntas, y varias negativas también soldadas e intercaladas en los espacios que dejan las primeras, de manera que haya una negativa más que

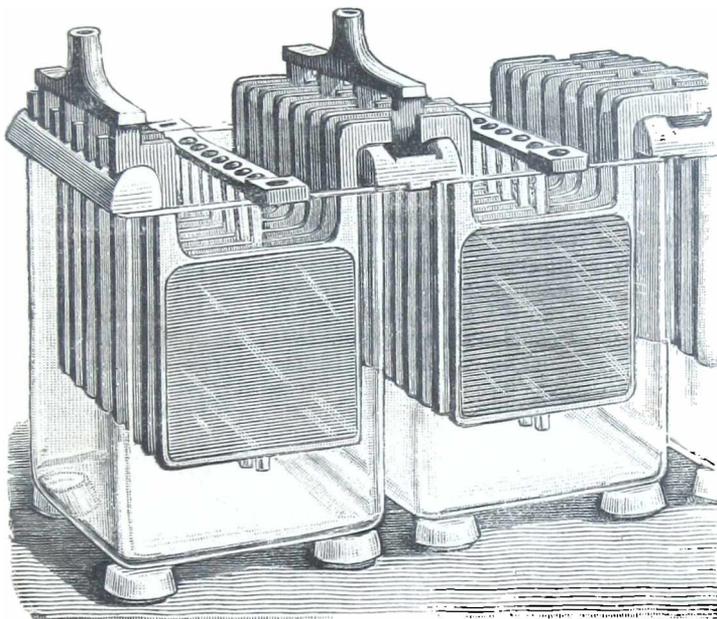


Fig. 743.

positivas. De este modo se aumenta mucho la superficie, disminuyendo al mismo tiempo la resistencia eléctrica del acumulador (768). Las láminas están dispuestas de manera que las partículas procedentes de su disgregación no puedan permanecer entre ellas y producir un corto circuito (768), sino que caen al fondo del cubo.

Por lo general, se yuxtaponen o se reúnen en serie varios acumuladores.

Fuerza electromotriz de los acumuladores. — Durante los primeros momentos después de la carga, la fuerza electromotriz de un acumulador pasa con frecuencia de 2,5 voltios; dos minutos después ha bajado a 2,10 voltios y, durante las dos terceras partes de la duración de la descarga, permanece superior a 1,9 voltio.

748. **Capacidad y rendimiento.** — Llámanse *capacidad* de un acumulador la cantidad de electricidad que puede dar por kilogramo de

placas, la cual es de unos 10 amperios-hora *. En los acumuladores más ligeros, los de los automóviles eléctricos, se obtiene una capacidad que llega a 20 amperios-hora por kilogramo.

Denominase *rendimiento* de un acumulador la relación que hay entre la cantidad de electricidad dada en la descarga y la que ha sido necesaria para la carga; éste puede llegar a 90 por 100 cuando el acumulador está bien aislado y cuando la descarga sucede inmediatamente a la carga.

749. Aplicaciones de los acumuladores. — Los acumuladores reemplazan con ventaja las pilas, porque dan una corriente intensa (por causa de su poca resistencia) y muy regular (por causa de la constancia de su fuerza electromotriz). Así es que se ha generalizado su empleo en telégrafos, en las máquinas de inducción, en los automóviles eléctricos, en ciertos tranvías, etc. En fin, las fábricas generadoras de corriente eléctrica tienen casi siempre una batería de acumuladores que las dinamos cargan por el día cuando se necesita menos corriente, y por la noche ayudan a la producción de la corriente intensa que requiere el alumbrado.

750. Acumuladores ligeros. — Acumulador Edison. — En general, el acumulador de automóviles eléctricos (1015) está constituido por un cubo de ebonita, que contiene agua acidulada, en la que se sumergen electrodos formados por una reja de plomo con antimonio que soporta las materias activas. Estas placas se hallan mantenidas a una distancia poco más o menos igual a su espesor por planchas de ebonita perforada.

A pesar de los perfeccionamientos, el acumulador de plomo tiene siempre poca capacidad y duración muy limitada. En las baterías más fuertes para automóvil, hay que cambiar las placas positivas después de unas 150 descargas; las negativas duran dos veces más. En los acumuladores de plomo; la duración y la capacidad son dos cualidades incompatibles.

Acumulador Edison. — Edison ha tratado de sustituir el plomo de los acumuladores por otros metales más ligeros. Su materia activa negativa es de hidrato de óxido férrico ($\text{Fe}^{\circ}\text{O}^{\circ}$) contenido en los alveolos de una placa de acero niquelado y perforado. Su materia activa positiva es de hidrato de óxido de níquel, mezclado con películas de níquel que aumentan su conductibilidad, y está contenida en una serie de tubos de palastro de acero niquelado y perforado; estos tubos sostenidos por una rejilla de acero niquelado forman la placa positiva.

La electrólisis es una solución de potasa a 20 por 100, que es preferible al agua acidulada, porque no desprende vapores ácidos.

Su carga se hace como para el acumulador de plomo, y ella determina la peroxidación del óxido de hierro. Su descarga vuelve las substancias activas a su estado primitivo.

La capacidad de un acumulador Edison, es doble de la de un acumulador de plomo ordinario, a igualdad de peso; pero su fuerza electromotriz es más pequeña (1,25 voltio).

PILAS IMPOLARIZABLES

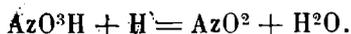
751. Polarización del elemento de Volta. — La debilitación de la corriente emitida por una pila de Volta es consecuencia directa de la polarización. El hidrógeno que desprende en el electrodo de cobre se adhiere a él y de aquí resulta una disminución de la primitiva fuerza electromotriz: dicese que la pila se ha polarizado.

Se suprime o se atenúa considerablemente la polarización en las

* *Amperio-hora* es la cantidad de electricidad que da 1 amperio en una hora, o sea 3 600 coulombios.

pilas, por la introducción de sustancias adecuadas que se llaman *cuerpos despolarizantes* o, simplemente, *despolarizantes*

752. **Pilas de despolarizante líquido o sólido. Pila de Bunsen.** — En el elemento de la *pila de Bunsen*, se quema el hidrógeno que polariza el electrodo positivo, rodeando este electrodo de ácido nítrico, cuerpo muy oxidante que, al contacto del hidrógeno, se transforma en peróxido de nitrógeno.



En electrodo positivo es una placa (o un cilindro) de carbón conductor C (fig. 744); está colocada en un vaso poroso de barro que contiene ácido nítrico. El electrodo negativo es, generalmente, un cilindro hueco de zinc amalgamado, sumergido en un vaso

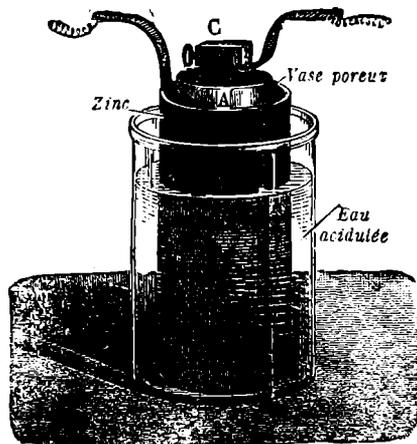
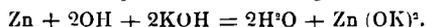


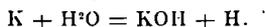
Fig. 744.

lleno de una solución con una décima parte de ácido sulfúrico. La fuerza electromotriz del elemento es, aproximadamente, 1,8 voltios. El desprendimiento de vapores nitrosos AzO^2 constituye un grave inconveniente de la pila de Bunsen.

Pila de Lalande y Chaperon. — El electrodo negativo es una varilla (o una lámina) de zinc amalgamado, sumergida en una solución de potasa. El electrodo positivo es una lámina de hierro o cobre recubierta de óxido de cobre. Cuando la pila emite una corriente, la potasa KOH se electroliza. En el ánodo de zinc quedan los iones OH que, con el zinc y la potasa, forman un zincato de potasio soluble, según la reacción

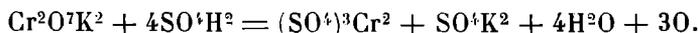


Los iones K van al cátodo y, con el agua, vuelven a dar potasa, según la reacción.



El hidrógeno que polarizaría el electrodo se quema por el óxido de cobre. Este queda, entonces, reducido al estado de cobre.

Pila de bicromato (de un solo líquido). — El líquido único consiste en una solución de bicromato de potasa adicionado con ácido sulfúrico. El electrodo positivo está constituido generalmente por dos placas de carbón conductor, fijas paralelamente a un disco de ebonita (fig. 745). Una lámina de cinc amalgamado, introducida entre estas placas, forma el electrodo negativo. Cuando el circuito está cerrado, se produce un sulfato doble de cromo y de potasio con desprendimiento de oxígeno, según la reacción



El oxígeno así producido quema el hidrógeno desprendido en el cátodo y suprime la polarización.

La fuerza electromotriz varía de 1,9 a 2 voltios.

El inconveniente de esta pila es la formación de un depósito de alambre de cromo $\text{SO}^4\text{K}^2 + (\text{SO}^4)^3\text{Cr}^2 + 24\text{H}^2\text{O}$. Con frecuencia se reem-

plaza el bicromato por ácido crómico, que no produce alumbre de cromo.

Elemento Leclanché. — Este elemento (fig. 746) se caracteriza por tener un *despolarizante sólido* que es una mezcla de bióxido de manganeso y de carbón de retorta de granos gruesos. El electrodo positivo es una placa de carbón, sumergida en el despolarizante. El electrodo negativo está constituido por un vástago de zinc sumergido en una solución de clorhidrato de amoniaco.

En circuito abierto, no hay ningún ataque del zinc. En circuito cerrado, pasa por él una corriente. El zinc sigue siendo polo negativo. es el ánodo. El clorhidrato de amoniaco (AzH^+Cl) se electroliza. El cloro va hacia el cinc y forma cloruro de zinc (ZnCl^2) que se disuelve. El

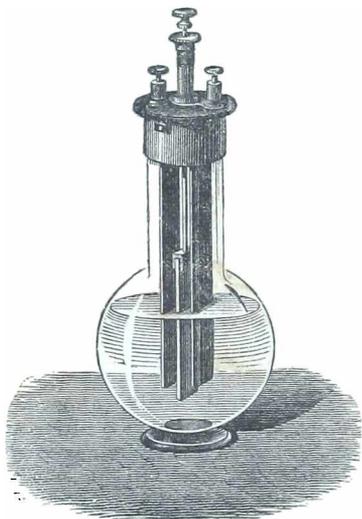


Fig. 745.

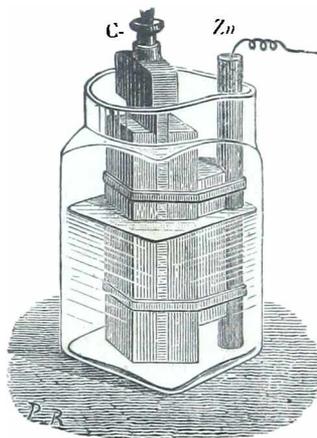


Fig. 746.

metal AzH^+ va al cátodo de carbón y, en él, se descompone en amoniaco (AzH^3), que se disuelve, y en hidrógeno. Este hidrógeno es quemado por el bióxido de manganeso, al que reduce y vuelve al estado de sesquióxido, formando agua.

Como el desgaste del zinc es nulo en circuito abierto, la pila puede funcionar sin interrupción durante varios meses, y su empleo es muy cómodo. Verdad es que no puede funcionar mucho tiempo sin polarizarse; pero esta polarización desaparece por sí sola, en circuito abierto. También se presta esta pila a usos intermitentes, como, por ejemplo, el entretenimiento de timbres o teléfonos.

Pilas sin líquido libre. — La pila Leclanché se ha transformado en pila transportable, sin líquido libre, haciendo absorber este líquido por celulosa de nuez de coco, que lo inmoviliza. En este principio están fundadas las pequeñas pilas de las lámparas eléctricas de bolsillo.

Pila de bióxido de plomo. — En esta pila (que también se llama *pila Silicia*) el polo negativo es una barra de cinc bien amalgamado; el electrodo positivo, de carbón, está rodeado de bióxido de plomo, el cual es reducido por el hidrógeno que polarizaría el

electrodo. La fuerza electromotriz se aproxima a 2 voltios. Esta pila tiene la ventaja de que se puede regenerar fácilmente el despolarizante cuando ha sido reducido. Se puede sea hacer pasar por la pila la corriente de una dinamo (como para volver a cargar un acumulador) reuniendo el electrodo positivo con el polo positivo de la dinamo, sea sumergir el conjunto del electrodo positivo y del despolarizante en hipoclorito (agua de Javel) que reoxida al despolarizante.

753. Pila de Becquerel (llamada de Daniell). — El electrodo negativo Z (fig. 747) es de zinc amalgamado; está sumergido en una solución de sulfato de zinc.

El electrodo positivo C está constituido por una lámina de cobre, que se baña en una solución concentrada de sulfato de cobre, contenido en un vaso de tierra porosa contenido dentro del primero.

Esta pila suministra una corriente muy constante, sobre todo si se tiene cuidado de mantener saturada la solución de sulfato de cobre, colocando en la parte superior del vaso poroso cristales de sal que van disolviéndose a medida que se empobrece el líquido. Pero tiene el inconveniente de gastarse con *circuito abierto*, sobre todo cuando el zinc está en contacto con agua acidulada o salada. Por eso es preferible una solución de sulfato de zinc; pues, en este caso, el desgaste es casi nulo.

Teoría. — Supongamos la pila formada de sulfato de zinc y de cobre. Cuando produce una corriente, se descompone el sulfato de cobre: el cobre se deposita en el cátodo, que es la lámina de cobre.

Análogamente, en el vaso exterior se descompone el sulfato de zinc: el ion SO_4^2 se desprende en el ánodo, que es la lámina de zinc, y la disuelve para reformar sulfato de zinc; el ion Zn se une al ion SO_4^2 que proviene de la descomposición del sulfato de cobre. En suma, se destruye 1 molécula de sulfato de cobre, mientras se produce 1 molécula de sulfato de zinc. La energía puesta en libertad procede de que el sulfato de cobre requiere, para descomponerse, una cantidad de energía inferior a la que da la formación de sulfato de zinc.

754. Elemento Callaud. — El elemento Daniell ha sido objeto de gran número de modificaciones. La más importante es la supresión del vaso poroso; la separación del despolarizante y del líquido ácido se obtiene entonces únicamente mediante la diferencia de sus densidades. Tal es el *elemento Callaud*, muy empleado en los servicios telegráficos.

Este elemento está contenido en un vaso único V de vidrio ó de loza (fig. 748). En él se encuentra una placa de cobre C a que se suelda un alambre de cobre α , aislado del resto de la pila por un barniz de gutapercha I. Por encima de la placa, y en un cilindro de vidrio r, hay una columna de cristales de sulfato de cobre; encima de la solución de



Fig. 747.

sulfato de cobre, y separada por la diferencia de densidades, hay una solución de sulfato de zinc: en el líquido se encuentra sumergido por entero un cilindro de zinc Z, análogo a los de los elementos Daniell; pero de una altura de veces menor, y suspendido por garfios D que descansan en el borde del vaso. La parte inferior del líquido se satura de sulfato de cobre.

755. **Pilas tipos.** — Las siguientes pilas, a causa de su constancia, se emplean como pilas tipos, en la medida de fuerzas electromotrices (786).

Elemento Latimer-Clark. — Se constituye introduciendo en el fondo de un frasco una

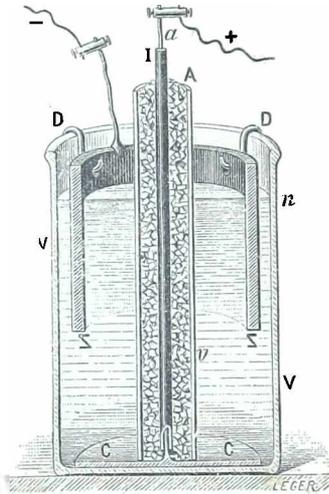


Fig. 748.

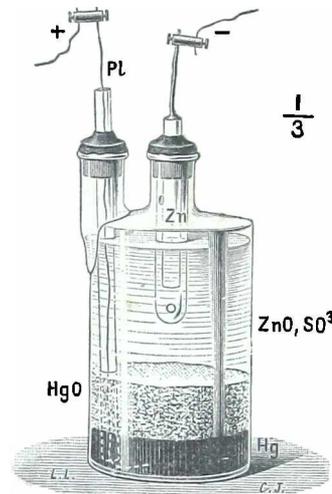


Fig. 749.

capa de mercurio cubierta de una capa de sulfato mercurioso (fig. 749). En el frasco hay una solución de sulfato de zinc en el cual se sumerge una lámina de zinc amalgamado que constituye el electrodo negativo. El mercurio, que constituye el electrodo positivo, comunica con el exterior por un alambre de platino aislado, por un tubo de vidrio, de la solución de sulfato de zinc.

La fuerza electromotriz de un Latimer-Clark es 1,432 a 15°.

Elemento Gouy. — Está constituido como el anterior; pero el sulfato mercurioso está reemplazado por óxido mercuríco HgO precipitado (óxido amarillo de mercurio). Su fuerza electromotriz a 15° es 1,390.

Elemento Weston, de cadmio. — Está constituido como el elemento Latimer-Clark; pero el zinc está sustituido por el cadmio y el sulfato de zinc por sulfato de cadmio. La fuerza electromotriz de este elemento es 1,0183 a 20°.

Elemento Daniell. — La misma pila Daniell sirve, a menudo, de pila tipo. Montada con sulfato de zinc y sulfato de cobre, su fuerza electromotriz es, a la temperatura ordinaria, 1,07.

PILAS TERMOELÉCTRICAS.

756. **Corrientes termoelectricas.** — Si se forma un circuito cerrado por medio de un par de dos conductores M y N (fig. 750) de distinta naturaleza, soldados en A y B, el experimento demuestra que, si se mantienen ambas soldaduras a temperaturas diferentes, se produce una corriente eléctrica en este circuito.

Para verlo, basta unir en A, retorciéndolos juntos (fig. 751) un alambre de hierro y otro de cobre que se ponen en comunicación con los dos extremos del hilo de cobre de un galvanómetro B. Si se calienta la

región A, se ve que la aguja del galvanómetro se mueve. Además, el sentido de la desviación indica que la corriente *va del cobre al hierro, pasando por la soldadura caliente A*. La corriente es tanto más intensa, cuanto más grande es la diferencia de temperatura de las dos soldaduras, siempre que no se eleve demasiado (758).

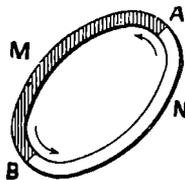


Fig. 750.

757. **Pilas termoeléctricas.** — La fuerza electromotriz de un *par termoeléctrico* es extremadamente pequeña; pero se puede formar una pila de notable fuerza electromotriz, reuniendo varios pares en serie.

En el par termoeléctrico, formado por dos metales, A y B, soldados en C y unidos por un alambre exterior (fig. 752), la experimentación demuestra que la fuerza electromotriz es la misma que si los dos metales estuvieran realmente soldados en dos lugares, y esto ocurre sea cual fuere la naturaleza del alambre interpuesto. Si se tiene una serie de pares (fig. 753), en los que se calientan todas las soldaduras C, mante-

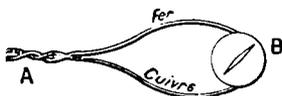


Fig. 751.

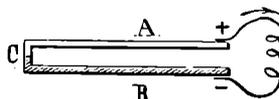


Fig. 752.

niéndose frías las otras, la fuerza electromotriz de la pila así formada es la suma de las fuerzas electromotrices de cada elemento.

Estas pilas tienen poca fuerza electromotriz* y dan *muy poco rendimiento*, a causa de la gran cantidad de calor perdida por irradiación. Por esta razón, las pilas termoeléctricas son poco usadas como generadores de corriente. Los fenómenos termoeléctricos se emplean especialmente para indicar y medir las pequeñas variaciones de temperatura (241).

No obstante la pequeñez de su fuerza electromotriz, las pilas termo-

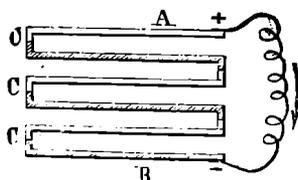


Fig. 753.

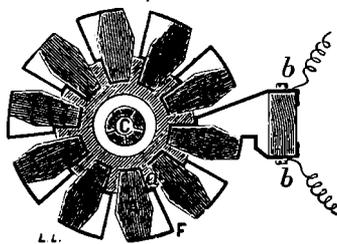


Fig. 754.

eléctricas pueden proporcionar corrientes suficientemente intensas en circuitos pocos resistentes, a causa de su poca resistencia interior.

Pila Clamond. — Está formada de elementos de hierro F y aleación de

* El par de mayor fuerza electromotriz es el par bismuto antimonio, en el que es de 0.000057 voltios, para una diferencia de temperatura de 1° entre las soldaduras.

zinc y de antimonio A (fig. 754) con soldadura autógena. Esos elementos

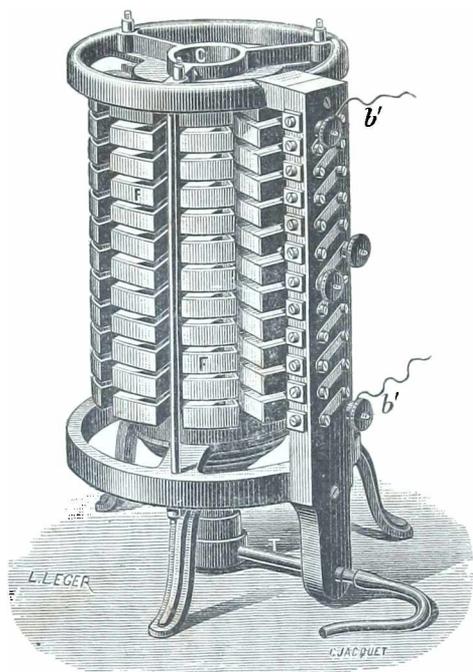


Fig. 755.

se asocian en series según capas horizontales unidas entre sí por sus polos de nombres contrarios (fig. 755). La pila se calienta bien con gas dentro de la chimena C, alrededor de la cual se encuentran dispuestas las soldaduras pares. Las impares están colocadas por fuera y se agrupan de modo que presenten gran superficie de enfriamiento.

758. Serie termoeléctrica. — Fenómeno de la inversión. — Las variaciones de sentido y de intensidad de la corriente termoeléctrica han sido estudiadas por varios físicos, entre otros Becquerel. Primeramente determinó el *sentido* de las corrientes obtenidas por la asociación de los diferentes metales, logrando colocarlos en un orden tal que si se asocia un metal de la serie con otro cualquiera de los que le siguen, da una corriente que va del primero al segundo, pasando por la soldadura caliente. Esta serie de metales, que se llama *serie termoeléctrica*, es la siguiente :

Bismuto.	Cobalto.	Plomo.	Hierro.
Niquel.	Manganeso.	Cobre.	Arsénico.
Platino.	Plata.	Oro.	Antimonio.
Paladio.	Estaño.	Zinc.	

Ciertos pares presentan el fenómeno de la *inversión*, es decir que la fuerza electromotriz, después de aumentar con la diferencia de temperatura establecida entre las los soldaduras, disminuye, y cambia después de sentido.

759. Leyes de las fuerzas electromotrices termoeléctricas. — Designando por $E^{\theta'}$ la fuerza electromotriz de un par cuyas soldaduras se mantienen respectivamente a las temperaturas θ (soldadura fría) y θ' (soldadura caliente) pueden enunciarse las leyes siguientes :

1º Ley de las temperaturas sucesivas. — La fuerza electromotriz de un par dado, entre dos temperaturas θ y θ' es igual a la suma de las fuerzas electromotrices del mismo par E^{θ_1} y E^{θ_2} , siendo θ_1 una temperatura comprendida entre θ y θ' .

2º Ley de los metales intermedios. — La fuerza electromotriz de un par que tiene uno de sus contactos a la temperatura θ , no cambia cuando se reemplaza el contacto por uno o varios metales a temperatura θ .

Será pues posible, sin cambiar nada, establecer una soldadura efectiva entre los dos elementos de un par.

760. Origen de las corrientes termoeléctricas. — Efecto Peltier. — Efecto Thomson. — Las corrientes termoeléctricas no provienen de acciones químicas, pues Becquerel observó que se producen también en el vacío o en un gas inerte, como el hidrógeno.

Magnus hizo ver que si se calienta en una de sus soldaduras un circuito de dos conductores cilindricos de cobre, de diámetro desigual; pero que se encuentran ambos en las mismas condiciones físicas no produce corriente, sea cual fuere la diferencia de diámetro y de masa entre sus conductores. Sólo hay corriente cuando existe una *diferencia de estructura o de densidad* a ambos lados del punto calentado.

Con estos hechos puede relacionarse el fenómeno descubierto por Peltier (efecto Pel-

tier). Cuando circula una corriente en un circuito formado por dos conductores diferentes, se produce una *elevación de temperatura o un enfriamiento*, según el sentido de la corriente, en el punto donde ésta sale de uno de los conductores para pasar al siguiente. La cantidad de calor cedida o tomada es proporcional a la intensidad de la corriente.

La cantidad de calor, tomada o cedida a una soldadura por una corriente dada, y durante un tiempo dado, es tanto mayor cuanto más elevada es la temperatura de la soldadura. Se comprende, pues, el origen de la energía de la corriente termoeléctrica. En efecto, cuando ésta se produce, absorbe calor de la soldadura caliente y da menor cantidad a la soldadura fría. La diferencia, evaluada en julios por culombio, mide la fuerza electromotriz del par.

Para explicar el fenómeno de la inversión, hay que tener también en cuenta las fuerzas electromotrices descubiertas por Thomson (Lord Kelvin) que se producen en todo conductor homogéneo en que la temperatura no está repartida uniformemente (*efecto Thomson*).

OBSERVACIÓN. — Si se imagina un par termoeléctrico que actúe sobre un motor eléctrico pequeño, se tiene una máquina térmica que transforma el calor en trabajo. Es de notar que el principio de Carnot (369) se cumple también aquí. En efecto, el calor es extraído de una procedencia caliente, la soldadura caliente; pero una parte es devuelta a una procedencia fría, la soldadura fría. La diferencia podría ser transformada enteramente en trabajo, si el motor fuese perfecto y si la intensidad de la corriente fuera infinitamente pequeña; en este caso, la cantidad de calor desprendida por esta corriente en los conductores, sería despreciable*.

Se ve que el principio de Carnot se aplica á la transformación del calor en trabajo por los más variados fenómenos.

CAPÍTULO IV

CALOR DESPRENDIDO POR LAS CORRIENTES RESISTENCIA ELÉCTRICA

761. Calor desprendido en los conductores de una corriente eléctrica. — Cuando un cuerpo cualquiera es recorrido por una corriente eléctrica, se produce un desprendimiento de calor que, si no se desvanece inmediatamente, eleva la temperatura del cuerpo.

En general, los conductores pierden este calor, ya por irradiación a través del aire ambiente, ya por convección a través de este aire, ya también por conducción calorífica a través de los cuerpos contiguos. Estas causas de pérdida de calor aumentan a medida que se eleva la temperatura; el conductor llega, pues, forzosamente, a una *temperatura límite* en la cual la pérdida es igual al desprendimiento del calor que produce la corriente. Esta temperatura es tanto más elevada, cuanto más intensa es la corriente y cuanto mejor se preserva al conductor de las causas de desperdicio del calor.

Este fenómeno puede ser un peligro, a causa de los incendios que

* Como esta cantidad de calor es proporcional al cuadrado de la intensidad de la corriente, cuando la intensidad de ésta es infinitamente pequeña, aquélla, a su vez, se vuelve también infinitamente pequeña con relación a la cantidad de calor desarrollada por el efecto Peltier, que es proporcional a la intensidad de la corriente.

puede provocar; por esto, teniendo en cuenta las aplicaciones usuales, ha habido que medir los diámetros que deben tener los conductores, colocados en distintas condiciones, para soportar sin peligro determinadas corrientes.

Corta-circuito. — Para suprimir los peligros de incendio y preservar los aparatos contra los accidentes debidos a los efectos caloríficos, se dispone, en el circuito, un alambre de aleación fusible de plomo y estaño, o mejor un alambre de estaño puro, colocado en una caja incombustible de porcelana, y que se funde cuando, por una causa cualquiera, la corriente es demasiado intensa: ésta queda de tal modo interrumpida. Por esta razón, dicho aparato ha recibido el nombre de *corta-circuito*.

762. **Ley de Joule.** — El experimento más sencillo indica que la cantidad de calor desprendida en un conductor por una corriente es tanto más grande, cuanto mayor es la intensidad de la corriente y cuanto mayor es la resistencia eléctrica del conductor. Por esta razón, si se intercala, en un circuito, un alambre delgado (de hierro o platino, por ejemplo), se lo ve calentarse al rojo, por efecto de una intensidad suficiente, luego, fundirse y hasta volatilizarse, si se aumenta dicha intensidad.

Joule estudió el modo de variar la cantidad de calor desprendida por una corriente en un conductor, y estableció la siguiente ley:

LEY DE JOULE. — *La cantidad de calor desprendida por una corriente en un mismo conductor es proporcional al tiempo durante el cual ha pasado la corriente e inversamente proporcional al cuadrado de la intensidad de la corriente.*

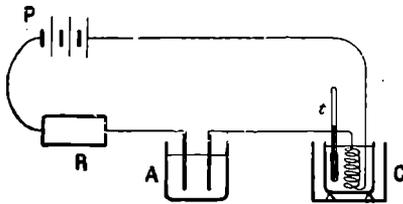


Fig. 756.

Se pueden repetir experimentos análogos a los suyos haciendo pasar la corriente ya de una pila, ya de una batería de acumuladores:

1° A un reóstato R (fig. 756), que permita variar la intensidad de la corriente;

2° A un amperímetro, o a un voltímetro de nitrato de plata A; del peso del metal depositado se deducirá la intensidad de la corriente;

3° A un hilo metálico enrollado en espiral y sumergido en el agua de un calorímetro C: la elevación de temperatura del agua, medida por el termómetro *t*, permitirá calcular la cantidad *Q* de calor desprendida (266).

* Para un alambre de cobre colocado debajo de una moldura de madera se tolera una elevación de temperatura de 10°: el cuadro siguiente da en este caso los diámetros necesarios para intensidades crecientes

Intensidades.	Diámetros.
1 amperio	0,38 mm.
10 —	1,75 —
20 —	2,77 —
50 —	5,08 —
100 —	8,08 —

Hácese pasar una corriente de intensidad constante, durante un tiempo suficiente, y se mide la cantidad de calor Q . Variando el tiempo durante el cual pasa la corriente, se verá que Q es proporcional a este tiempo — lo que, por otra parte, era evidente. Repitiendo el experimento con una corriente, 2, 3, 4... veces más intensa, se reconoce que, durante el mismo tiempo, la cantidad de calor desprendida en el mismo hilo es 4, 9, 16... veces mayor. En general, se observa que es proporcional al cuadrado de la intensidad de la corriente.

RESISTENCIA ELÉCTRICA

763. Resistencia eléctrica. — Unidad de resistencia. — Ohmio. — Si se carga el conductor sumergido en el calorímetro, se observa, en general, que durante el mismo tiempo, y para igual intensidad de corriente, no se desprende la misma cantidad de calor y que este desprendimiento está en relación con la resistencia del conductor. Este experimento nos conduce a la definición exacta de la resistencia.

Convendremos en decir que, si una corriente desprende en un conductor una cantidad de calor p veces mayor que en otro, la resistencia eléctrica del primer conductor es p veces más grande que la del segundo, es decir que, por definición: *la cantidad de calor que, en un tiempo dado, desprende en un conductor una corriente de intensidad determinada, es proporcional a la resistencia del conductor.*

Se ha elegido una unidad de resistencia a la que se ha denominado *ohmio*. El ohmio es *la resistencia de un conductor en que una corriente de 1 amperio desprende, por segundo, una cantidad de calor equivalente a 1 julio.*

De esta definición y de la ley de Joule resulta que, si una corriente de i amperios pasa en un conductor de resistencia r ohmios, durante t segundos, se desprende en él una cantidad de energía calorífica.

$$E = ri^2t \text{ julios;}$$

es decir, una cantidad de calor

$$Q = \frac{ri^2t}{4,18} = 0,24 ri^2t \text{ calorías.}$$

Valor del ohmio. — Ohmio tipo. — La evaluación de la cantidad de calor que desprende una corriente en un conductor podría servir para medir la resistencia de este conductor. Esta medida se efectúa más cómodamente por otros procedimientos (783).

Se ha hallado (849) que el ohmio es igual a la resistencia *de una columna de mercurio que tenga un milímetro cuadrado de sección y 106,3 centímetros de longitud, mantenida a la temperatura de 0°.*

Según esto, puede realizarse un *ohmio tipo* y sacar, luego, copias de este ohmio y de sus múltiplos, para comparar con él las resistencias de los diversos conductores (783).

El ohmio tipo (fig. 757) está constituido por un tubo de vidrio encorvado varias veces y que contiene mercurio y termina por dos anchos vasitos que también contienen mercurio y cuya resistencia eléctrica es muy pequeña, gracias a su gran sección (764). El conjunto está

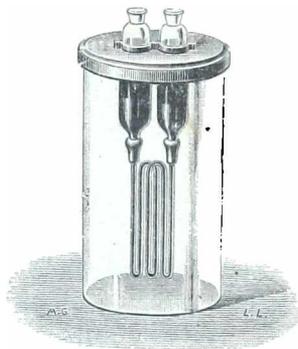


Fig. 757.

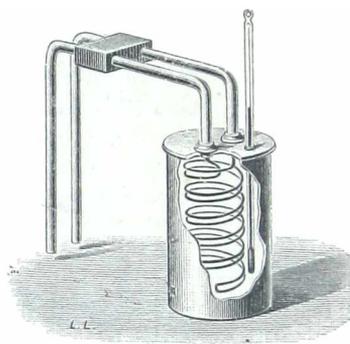


Fig. 758.

colocado en un vaso en que se introduce hielo fundente. La figura 758 representa una copia de este ohmio, compuesta de un hilo metálico arrollado de modo a formar un carrete sin self-inducción (859), y colocado en un recinto cuya temperatura es dada por un termómetro.

764. **Resistencia de un conductor cilíndrico. — Leyes de Ohm.** — Llámanse conductor cilíndrico al que tiene la misma sección en todos sus puntos, es decir, que, si estuviera derecho, tendría la forma de un cilindro. Las leyes de la resistencia de semejante aparato fueron enunciadas por Ohm :

La resistencia de un conductor cilíndrico de sustancia determinada es proporcional a su longitud e inversamente proporcional a su sección.

Demostración. — Se puede dar una demostración *a priori*, fundada en la misma definición de la resistencia de un conductor.

1º Es evidente que la cantidad de calor desprendida por una corriente dada, en un tiempo dado, en un conductor cilíndrico, es proporcional a su longitud, porque se desprenden cantidades de calor iguales en porciones de igual longitud.

2º Supongamos dos conductores de la misma longitud l cm. y uno de los cuales tiene una sección S , y el otro, una sección S' (fig. 759). Sea s una medida común entre S y S' , contenida n veces en S y n' veces en S' . Podemos suponer que el conductor S está formado

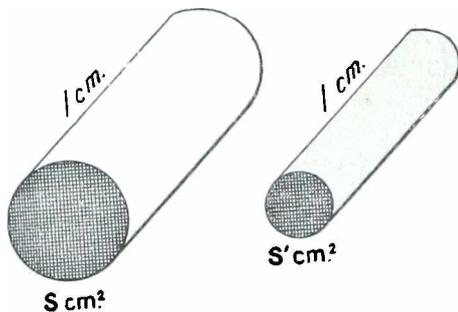


Fig. 759.

mado por n conductores de sección s y de longitud l , unidos unos a otros. Sea r la resistencia de uno de estos conductores. Hagamos pasar una corriente I por el conductor S ; es evidente que, por cada uno de los conductores de sección s , pasará una corriente de intensidad $\frac{I}{n}$. La cantidad de calor q desprendida, en un segundo, en uno de los conductores, será, pues, equivalente a $r \left(\frac{I}{n}\right)^2$ julios. Y la cantidad de calor Q desprendida en

el conductor entero de sección S será n veces mayor. Por tanto, Q es equivalente a $\frac{rI^2}{n}$ julios.

Del mismo modo, si hacemos pasar la corriente I amperios por el conductor de sección S' , se hallará que desprende una cantidad de calor Q' equivalente a $\frac{r'I^2}{n'}$ julios. Luego tendremos

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{rI^2}{n} : \frac{r'I^2}{n'} = \frac{n'}{n}.$$

Pero también tenemos

$$\frac{S'}{S} = \frac{n'}{n}; \quad \text{de donde} \quad \frac{Q'}{Q} = \frac{S'}{S}.$$

La relación de las cantidades de calor desprendidas por una corriente I amperios, en 1 segundo, en ambos conductores, es igual al cociente de sus resistencias RR' ; por consiguiente :

$$\frac{R}{R'} = \frac{S'}{S}.$$

765. Variación de la resistencia con la sustancia. — Resistividad. — En igualdad de longitud y de sección, si se cambia la naturaleza del alambre, la resistencia varía. Esto se demuestra experimentalmente, comparando, por el método del puente de Wheatstone (783), las resistencias de dos conductores de iguales dimensiones, pero de diferentes sustancias.

Explicase este fenómeno diciendo que las distintas sustancias no tienen la misma *resistividad*. Se entiende por *resistividad* o *resistencia específica* de una sustancia la *resistencia de un cilindro de esta sustancia que tenga 1 centímetro cuadrado de sección y 1 centímetro de longitud*.

Sean l la longitud y s la sección de un conductor cilindrico de una sustancia de resistividad ρ . De las leyes de Ohm y de la definición de la resistividad, resulta que la resistencia r del conductor está determinada por la fórmula :

$$r = \rho \frac{l}{s}.$$

Esta fórmula permite calcular la resistencia de un conductor cilindrico de dimensiones conocidas cuando se conoce también la resistividad de la sustancia que lo constituye*.

OBSERVACIONES. — 1º Las resistencias muy pequeñas se evalúan en *microhmios* o *millonésimas de ohmio*. La resistencia de un conductor de cobre de 1 centímetro cuadrado de sección y de 1 centímetro de longitud es 1,6 microhmios. Las resistencias muy grandes se miden por *megohmios* o millones de *ohmio*. Así la resistividad del vidrio ordinario a 20º es 91 000 000 megohmios, 0 91 megamegohmios; la del caucho a 0º es 32 000 000 000 megohmios, 0 32 000 megamegohmios.

*. He aquí la resistividad de algunas sustancias :

Plata	1,45 × 10 ⁶	Mercurio	9 × 10 ⁶
Cobre	1,6 × 10 ⁶	Carbón de retorta	0,7
Platino	14,0 × 10 ⁶	Ácido nítrico	2,1
Hierro	9,5 × 10 ⁶	Solución saturada de	
Maillechort	3 × 10 ⁶	sulfato de cobre	37

2º *Conductancia. — Conductividad.* — Llámanse *conductancia* de un conductor, la inversa de su resistencia, y *conductividad* de una sustancia, la inversa de su *resistividad*.

Variaciones de la resistividad de una sustancia. — 1º Efecto de la pureza. — La resistividad eléctrica de una sustancia varía mucho con su pureza. Restos de sustancias extrañas pueden aumentarla notablemente.

2º *Efecto del temple.* — Asimismo, el temple de un metal puede aumentar en un 10 por 100 su resistividad.

3º *Efecto de la temperatura. — Caso de los metales y conductores metálicos.* — En los metales, la resistividad aumenta con la temperatura. Numerosos cuerpos conductores, tales como los sulfuros cristalizados (piritas, etc.) se conducen como los metales; se denominan *conductores metálicos*.

En pequeñas variaciones de temperatura, la variación de la resistividad de un metal es proporcional a la variación de temperatura; de manera que si ρ_0 representa la resistividad de un metal a 0º, su resistencia ρ a t° quedará determinada por la fórmula :

$$\rho = \rho_0 (1 + Kt),$$

en que K es un coeficiente constante.

El coeficiente K es, poco más o menos, el mismo para todos los metales sólidos puros. Se acerca mucho a $\frac{1}{273}$. Este fenómeno fué indicado primeramente por Becquerel. En 1885, Bouty y Cailletet demostraron que esta ley es muy exacta entre 0º y — 100º y que puede aplicarse a la medición de temperaturas bajas.

Para el mercurio, la variación de la resistencia con la temperatura se hace particularmente interesante por el empleo de tipos de mercurio.

Según Guillaume, la resistividad aparente del mercurio en un tubo de vidrio duro* nos es dada por la fórmula :

$$\rho' = \rho_0 (1 + 0,00088023 t + 0,0000010063 t^2).$$

Sirviéndose de los resultados de Benoit y Chappuis sobre la dilatación del vidrio, se deduce, para la verdadera resistividad del mercurio,

$$\rho = \rho_0 (1 + 0,000887 t + 0,0000010181 t^2).$$

Caso de las aleaciones. — El coeficiente K es, generalmente, mucho más pequeño en las aleaciones que en los metales puros. Por ejemplo, para el *mallechort* (Cu, 60,16; Zn, 23,37; Ni, 14,03), $K = 0,0003$.

En la *manganita* (Cu, 84; Mn, 12; Ni, 4) y en el *constantano* (Cu, 60; Ni, 40), el coeficiente es prácticamente nulo; la resistencia de estas aleaciones varía muy poco con la temperatura (la de la *manganita* es $4,2 \times 10^{-5}$, la del *constantano* 5×10^{-5}).

Caso de los electrólitos. — En los electrólitos y en algunos otros conductores como el carbón, la resistividad disminuye al aumentar la temperatura.

Electrólitos fundidos. — Experimentos de L. Poincaré. — Los electrólitos, especialmente las sales, son conductores y descompuestos por la corriente, cuando han sido reducidos al estado líquido por fusión ígnea. Su conductividad crece según una ley lineal representada por la fórmula $C = C_0 [1 + K (t - \theta)]$, siendo θ la temperatura más baja en que se empezaron las medidas. Poincaré ha demostrado que el coeficiente K varía en razón inversa de la densidad de la sal que se estudia.

4º *Caso del bismuto en un campo magnético. — Fenómeno de Hall.* — Hall ha demostrado que la resistencia de un alambre de bismuto aumenta cuando se lo coloca en un campo magnético. Este fenómeno ha sido aplicado a la medida de la intensidad de un campo magnético.

5º *Caso del selenio bajo la acción de la luz.* — El selenio sometido a una recocción prolongada, a temperatura algo inferior a su punto de fusión, posee una resistividad que disminuye cuando aumenta la iluminación.

766. **Conductores industriales.** — El cobre es el metal más usado en los conductores industriales. Como la resistividad del cobre aumenta notablemente con las impurezas, sobre todo del óxido de cobre CuO, se emplean cobres muy puros, preparados por electrólisis. La propiedad que tiene el cobre de alargarse por tracción ha impedido, durante

* Esta resistividad aparente es la resistividad medida suponiendo que las dimensiones del tubo que contiene el mercurio no cambian con la temperatura.

mucho tiempo. su uso en las líneas aéreas, por ejemplo, en las telegráficas. Actualmente se fabrican alambres de bronce fosforoso o silíceo que tienen tenacidad y dureza a propósito. Estos reemplazan ventajosamente al hierro, que antes, era el único aplicado a las líneas telegráficas, y cuya resistividad es 6 o 7 veces mayor.

Empleo del aluminio. — Este metal es más tenaz que el cobre y mucho más ligero. y su precio ha bajado considerablemente en estos últimos años. Por eso se empieza a hacer uso de él para conductor de las corrientes industriales. aunque su resistividad es algo mayor que la del cobre. Tiene también el defecto de ser menos maleable y dúctil que el cobre, inconveniente que, unido al del gran espesor de los conductores, hace menos fácil su instalación.

CAPÍTULO V

LEYES DE OHM DIFERENCIAS DE POTENCIALES ELÉCTRICOS

767. **Ley de Ohm relativa á un circuito.** — La siguiente ley, conocida con el nombre de ley de Ohm, precisa la relación que existe entre la intensidad de la corriente producida por un generador de corriente en un circuito, la resistencia de este circuito y la fuerza electromotriz del generador.

Consideremos un generador de corriente, por ejemplo un elemento de pila de fuerza electromotriz e (737); sea r la resistencia del circuito intercalado entre sus polos y r' , la de la misma pila; llámase r' la *resistencia interior* de la pila, r , la *resistencia exterior* y $r' \times r' (= R)$ *resistencia total*.

LEY DE OHM. — Cuando un generador de corriente está intercalado en un circuito (que no comprende ningún aparato que posea una fuerza electromotriz, o una fuerza contra-electromotriz) la intensidad de la corriente se obtiene hallando el cociente de la fuerza electromotriz del generador por la resistencia total del circuito.

Esta ley se expresa algébricamente por la ecuación

$$i = \frac{e}{R}.$$

Demostración. — Supongamos que el generador haya producido una corriente de i amperios, durante el tiempo t ; habrá proporcionado una energía igual a eit , mientras que, en el conductor, se desprende una energía igual a Ri^2t . Según el principio de la conservación de la energía, estas dos cantidades deben ser iguales; luego, tendremos:

$$eit = Ri^2t;$$

de donde $e = Ri,$ o $i = \frac{e}{R}.$

Caso general. — En el caso más general, al mismo tiempo que uno o varios generadores en serie, pueden intercalarse en el circuito diversos aparatos llamados *receptores*,

tales como vasos de electrólisis, motores, etc. Estos aparatos absorben energía y poseen una fuerza contraelectromotriz, que está medida por el número de julios que absorben por el paso de un culombio.

Sean $e, e', e'' \dots$ las fuerzas electromotrices de los generadores; $e_1, e'_1, e''_1 \dots$ las fuerzas contraelectromotrices de los receptores. Si la energía i se produce durante el tiempo t , la energía total que producen los generadores es $(e + e' + e'' + \dots) it$. La energía absorbida por los receptores es $(e_1 + e'_1 + e''_1 + \dots) it$; y, llamando R a la resistencia total del circuito, resulta que, en este circuito, se desprende una cantidad de energía calorífica Ri^2t . Luego tendremos :

$$(e + e' + e'' + \dots) it = (e_1 + e'_1 + e''_1 + \dots) it + Ri^2t;$$

de donde :

$$Ri = e + e' + e'' + \dots - (e_1 + e'_1 + e''_1 + \dots) = \Sigma e,$$

llamando Σe a la suma algébrica de las fuerzas electromotrices y contraelectromotrices de los aparatos intercalados en el circuito (contándose aquéllas positivamente y éstas negativamente).

Por consiguiente, la fórmula general para calcular la intensidad es

$$i = \frac{\Sigma e}{R}.$$

768. Constantes de una pila. — Corriente máxima producida por una pila. — Las constantes de una pila o de un generador cualquiera son : la fuerza electromotriz y la resistencia interior.

La resistencia interior es tanto más pequeña cuanto mayor es la superficie de los electrodos y menor su distancia. Esto es una consecuencia directa de las leyes relativas a la resistencia de un conductor (764).

La corriente más intensa que puede proporcionar una pila corresponde evidentemente a una resistencia exterior despreciable; puesto que, entonces, la resistencia total del circuito reduce a la resistencia interior de la pila. Por ejemplo, una pila de 2 voltios de fuerza electromotriz y 2 ohmios de resistencia interior no podrá producir una corriente cuya intensidad supere a $2 : 2 = 1$ amperio.

En general, las pilas tienen una resistencia interior notable y no se debe temer un *corta-circuito* peligroso al reunir los polos por un alambre de resistencia despreciable. No ocurre lo mismo con los generadores de poca resistencia interior, tales como acumuladores y dinamos; que dan una corriente de intensidad perjudicial para el aparato, cuando se colocan sus polos en *corta-circuito*.

769. Reunión de las pilas. — Dado un cierto número de elementos de pila, se pueden asociar éstos, o como se dice generalmente, *parearlos*, de diversas maneras.

Ejemplo : el caso de seis elementos. — Se pueden formar cuatro combinaciones, cada una de las cuales constituye una pila de 6 elementos.

1º Reúnense los elementos uniendo el polo



Fig. 760.

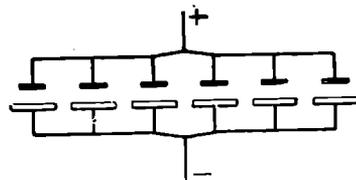


Fig. 761.

negativo del 1º al positivo del 2º y así sucesivamente : esta es la asociación en serie o en tensión (fig. 760).

2º Asíanse los seis elementos reuniendo, por una parte, todos los polos positivos, y, por otra, todos los negativos (fig. 761), asociación denominada en *batería*, o en paralelo.

3º y 4º Puede formarse, ora dos series paralelas de tres elementos cada una (fig. 762) ora tres series de dos elementos (fig. 763), reuniendo, luego, los polos positivos de ambas series, por una parte y los negativos, por otra, constituyendo, así, la asociación *mixta*, o en series paralelas.

Ventajas e inconvenientes. — 1ª *Pila en serie.* — Ya sabemos que la fuerza electromotriz *total* es igual a la suma de las fuerzas electromotrices de los elementos (741). La resistencia interior *total* será, evidentemente, igual a la suma de las resistencias interiores de los elementos.

Supongamos *n* elementos idénticos, de fuerza electromotriz *e* y de resistencia interior *r'*. La fuerza electromotriz de la pila total es *ne* y su resistencia, *nr'*. Si reunimos sus polos por un alambre *r*, que constituya la resistencia exterior, tendremos una corriente de intensidad *i*, determinada por la fórmula.

$$i = \frac{ne}{r + nr'}$$

Si la resistencia exterior es muy pequeña, de modo que pueda despreciarse ante *nr'*, tendremos :

$$i = \frac{ne}{nr'} = \frac{e}{r'}$$

La intensidad es, pues, *la misma* que si no se hubiera colocado sino un elemento de pila. Por el contrario, si *r* es muy grande, de modo que pueda despreciarse *nr'* ante *r*, tendremos :

$$i' = \frac{ne}{r}$$

La intensidad de la corriente es, pues, *n veces mayor* que con un solo elemento. Luego conviene emplear este método de asociación cuando la resistencia exterior es grande.

2ª *Pila en batería.* — Este método de asociación se reduce a formar un solo elemento que tiene un electrodo de superficie igual a *n* veces la de un elemento y, en consecuencia, de igual fuerza electromotriz y de resistencia *n* veces menor $\frac{r'}{n}$.

La intensidad de la corriente producida en un circuito exterior de resistencia *r*, es, pues,

$$i' = \frac{e}{\frac{r'}{n} + r} = \frac{ne}{r' + nr'}$$

En este caso, si *r* es tan grande que pueda despreciarse a *r'* delante de *nr'*, tendremos $i = \frac{ne}{nr'} = \frac{e}{r'}$; luego la intensidad es *la misma* que con un solo elemento.

Peró, si la resistencia *r* es tan pequeña que pueda despreciarse *nr* delante de *r'* tendremos $i = \frac{ne}{r'}$; la intensidad será, pues, *n veces más grande* que la que resultaría con un solo elemento.

Por lo tanto, este método de asociación es ventajoso cuando la resistencia exterior es muy pequeña.

3ª *Pila mixta o en series paralelas.* — En general, siendo *n* el número de elementos, puede formarse una batería que comprenda *p* series de *q* elementos cada una, de modo que resulte $pq = n$.

En este caso, la fuerza electromotriz de la pila es igual a la de una serie, *qe*, por ejemplo, y la resistencia es igual a la *p*ª parte de la resistencia *qr'* de una serie. Por tanto, la intensidad *i* de la corriente producida por la pila en un circuito exterior de resistencia *r*, será :

$$i = \frac{qe}{\frac{qr'}{p} + r} \quad \text{o} \quad i = \frac{pqe}{qr' + pr} = \frac{ne}{qr' + pr}$$

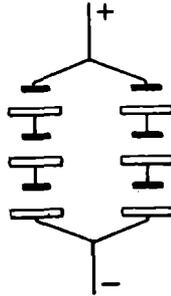


Fig. 762.

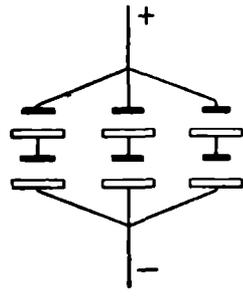


Fig. 763.

OBSERVACIÓN. — La corriente máxima se obtiene cuando la resistencia exterior iguale a la interior.

En efecto, el valor de i será evidentemente máximo cuando el denominador $qr' + pr$ sea mínimo. Pero, este denominador es la suma de dos términos cuyo producto $pqr = nrr'$ es constante. Luego su minimum se obtendrá cuando los dos sumandos sean iguales, es decir, cuando resulte

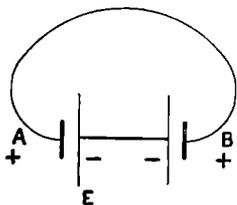


Fig. 764.

$$qr' = pr \quad \text{o} \quad r = \frac{q}{p}r'$$

Pila en oposición. — Dicese que dos elementos de pila están agrupados en oposición cuando se colocan en un circuito reuniendo sus polos de mismo nombre (fig. 764). El sistema es equivalente a una pila cuya fuerza electromotriz sea la diferencia de las fuerzas electromotrices de los dos elementos, de manera que si son iguales estas fuerzas electromotrices no circule ninguna corriente por el circuito AB.

DIFERENCIAS DE POTENCIALES ELÉCTRICOS

770. **Definición de la diferencia de potenciales entre dos conductores.** — 1° *Experimentos.* — Si dos polos de una pila o de cualquier otro generador de corriente comunican con dos conductores aislados A y B (fig. 765), estos conductores se hallan en un estado eléctrico particular, que se manifiesta uniéndolos por alambres conductores,

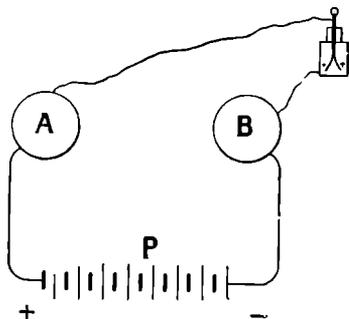


Fig. 765.

uno con el vástago y otro con la caja metálica de un electroscopio de panes de oro (724). Entonces, estos panes divergen, cargados positivamente si comunican con el cuerpo A, unido al polo positivo, y negativamente, si comunican con B, unido al polo negativo (725).

El estado eléctrico manifestado por la desviación de las hojas de oro puede establecerse en otras circunstancias, sin que los cuerpos A y B comuniquen con los polos de un generador de corriente.

Así : puede frotarse ambos conductores o solamente uno de ellos, someterlos a la influencia de un cuerpo electrizado (893), etc. Si A y B comunican uno con el vástago y el otro con la caja del electroscopio, en ciertos casos, los panes se desviarán cargados positivamente, en otros, se cargarán negativamente y, en fin, en algunos, no se desviarán.

Sean cuales fueren las condiciones eléctricas en que se hallen colocados los conductores A y B, con tal que no estén recorridos por ninguna corriente, esto es, que se encuentren en *equilibrio eléctrico*, se observa que la divergencia de los panes es la misma cualesquiera que sean los puntos de A y B que se unan al electroscopio. Y si se une el vástago y la caja de un electroscopio, a un mismo conductor, en equilibrio eléctrico, los panes nunca se desviarán, aunque dicho conductor se hallare intensamente cargado.

2º DEFINICIÓN. — *Se dice que, entre dos conductores A y B, existe diferencia de potenciales eléctricos o diferencia de nivel eléctrico, cuando las láminas de oro de un electroscoPIO se desvían al poner el vástago de éste en comunicación, mediante un alambre, con uno de los conductores, A, y la caja con el otro conductor B. Si las hojas se cargan positivamente, dícese que el potencial de A es superior al de B. En caso contrario, se dice que aquél es inferior a éste.*

Esta definición y el nombre de *diferencia de nivel eléctrico* quedan justificados por la analogía hidráulica que ya hemos explicado (727).

3º De los experimentos anteriores, se deduce la siguiente ley :

LEY. — *Entre los distintos puntos de un conductor en equilibrio eléctrico, no existe ninguna diferencia de potenciales ; o, en otros términos :*

El potencial de un conductor en equilibrio eléctrico es el mismo en todos sus puntos (911).

771. **Valor numérico de una diferencia de potenciales. Unidad de diferencia de potenciales.** — 1º *Experimentos.* — Si se unen los dos polos de una pila, en circuito abierto, uno con el vástago y otro con la caja de un electroscoPIO, se observa una divergencia de los panes, que es la misma sean cuales fueren las condiciones eléctricas en que se coloque el sistema, con tal que no sea recorrido por una corriente. Así, no cambia, si, por ejemplo, se aísla el sistema entero y si se carga de cualquier cantidad de electricidad.

Al contrario, si se repite el experimento con otra pila de mayor fuerza electromotriz (por ejemplo compuesta de mayor número de elementos en tensión), se ve que aumenta la divergencia de los panes. En cambio, disminuye, si la fuerza electromotriz de la segunda pila es más pequeña que la de la primera.

2º Estos experimentos justifican la definición siguiente :

DEFINICIÓN. — *La diferencia de potencial que existe entre los dos polos de un generador de corriente, en circuito abierto, se representa por el mismo número que la fuerza electromotriz del generador y se expresa en voltios.*

Por ejemplo, una pila cuya fuerza electromotriz es 100 voltios, establece entre sus polos, en circuito abierto, una diferencia de potencial de 100 voltios.

Por consiguiente, el voltio es la unidad de diferencia de potencial, al mismo tiempo que la unidad de fuerza electromotriz.

En realidad, la fuerza electromotriz de un generador de corriente y la diferencia de potencial que establece entre sus polos, en circuito abierto, no son magnitudes idénticas: entre ellas, existe la misma relación que entre la presión producida por una bomba y la *diferencia de niveles hidrostáticos* que es capaz de establecer entre dos vasos con los cuales comunique (727). Pero, así como una presión puede expresarse por una diferencia de niveles hidrostáticos, así también, una fuerza electromotriz y una diferencia de potenciales pueden expresarse por medio de una misma unidad, el voltio.

2º *Evaluación de una diferencia cualquiera de potencial.* — Se puede

evaluar en voltios la diferencia de potencial que exista entre dos conductores A y B, del modo siguiente. Se pone a estos conductores en comunicación, uno con el vástago y otro con la caja de un electroscopio; se nota la divergencia de las láminas, por medio de una esfera graduada colocada detrás de ellas; después, se escoge una pila que produzca la misma divergencia de las láminas al poner sus polos en comunicación uno con el vástago y otro con la caja del electroscopio. La fuerza electromotriz de la pila y la diferencia de potenciales entre A y B estarán representadas por el mismo número de voltios.

También se puede *marcar* de antemano el electroscopio, poniendo en comunicación los panes de oro y la caja sucesivamente con los polos de pilas de fuerza electromotriz creciente y conocida (por ejemplo 50, 100, 150, 200... acumuladores pequeños en serie, que den sensiblemente 100, 200, 300, 400... voltios) y anotando en él las desviaciones correspondientes.

OBSERVACIÓN. — El electroscopio de panes de oro es poco sensible e incapaz de manifestar pequeñas diferencias de potenciales. Así es que se le sustituye por aparatos más sensibles y exactos que estudiaremos más adelante, por ejemplo, por el electrómetro de cuadrantes (946) o el capilar (948).

772. **Trabajo eléctrico.** — *Para pasar la electricidad de un conductor a otro de potencial más elevado, es necesario un trabajo, que se expresa en julios, multiplicando la cantidad de electricidad transportada, por la diferencia de potenciales que existe entre ambos conductores.*

La siguiente comparación hidráulica aclara esta proposición. Supongamos que una bomba rotativa comunica, por su tubo de aspiración, con un vaso B (fig. 737) y, por su tubo de repulsión, con otro vaso A cuyo nivel es más elevado que el de B. Si la bomba traslada de B a A una cantidad de agua (suficientemente pequeña para que no cambie sensiblemente la diferencia de nivel entre A y B) debe producir un trabajo, que se evalúa multiplicando, por la diferencia de niveles entre los dos vasos, el peso del agua que pasa de B a A.

Del mismo modo, supongamos que los dos polos de una pila P (fig. 763) comunican con los dos conductores A y B, entre los cuales establece aquélla una diferencia de potenciales V , igual a su fuerza electromotriz e . Supongamos que dicha pila transmite de B a A electricidad positiva. Para esto, basta imaginar que se aumentan las dimensiones de B. Este aumento debe ser muy lento, para que sea muy pequeña la corriente de carga que se produzca. De este modo, la energía calorífica desprendida por la corriente, que es proporcional al cuadrado de la intensidad de ésta, podrá desprejarse, ante la energía producida por la pila que es proporcional a esta intensidad. Al mismo tiempo, gracias a la pequeñez de la intensidad de la corriente, la diferencia de potenciales V entre A y B, permanecerá igual a la fuerza electromotriz e de la pila. En esta operación, prodúcese una corriente infinitamente pequeña i , durante el tiempo t ; es decir, que si la pila ha transmitido una cantidad de electricidad $q = it$, de B a A, propor-

ciona una energía $E = cil = eq$, o $E = Vq$ julios. Luego, en este caso particular, queda demostrado el enunciado anterior. Pero, en virtud del principio de la conservación de la energía, sea cual fuere el procedimiento empleado para pasar de B a A * q culumbios, se debe consumir la misma cantidad de energía. La proposición enunciada, es, pues, general.

Caso inverso. — En virtud del principio de la conservación de la energía, si después de pasar q culumbios de B a A, se los conduce de A a B, como el sistema vuelve a su primitivo estado, la segunda transformación desarrollará una cantidad de energía igual a la consumida en la primera :

Por consiguiente :

Cuando la electricidad pasa de un conductor a otro de menor potencial, es capaz de producir una cantidad de energía que se evalúa en julios multiplicando la cantidad de electricidad transportada por la diferencia de potenciales existente entre los dos conductores.

Este caso es análogo al en que el agua pasa de un nivel a otro menos elevado. En este caso, es capaz de producir un trabajo igual al producto del peso del agua que ha pasado por la diferencia de niveles.

Evaluación de una diferencia de potenciales por medio del trabajo eléctrico. — Sea \mathcal{E} el valor en julios de la energía desarrollada al pasar q culumbios de un conductor B a otro A que tenga con el primero una diferencia de potenciales V .

Tendremos :

$$\mathcal{E} = Vq; \quad \text{de donde} \quad V = \frac{\mathcal{E}}{q} \text{ voltios.}$$

Por consiguiente :

La diferencia de potenciales que existe entre dos conductores A y B es igual al cociente del número de julios que mide la energía desarrollada al hacer pasar la electricidad de un conductor B a otro A, por el número de culumbios que mide la cantidad de electricidad así transportada, siempre que este transporte no modifique sensiblemente la diferencia de potenciales que existía entre los conductores.

El potencial de A es superior al de B si, para efectuar este transporte, ha habido que consumir energía; el potencial de A es inferior al de B si, durante el transporte, se recoge energía.

OBSERVACIÓN. — Si hacemos a $q = 1$, en la fórmula anterior, tendremos :

$$V = \mathcal{E} \text{ voltios.}$$

Luego :

La diferencia de potenciales que existe entre dos conductores es igual al número de julios que mide la energía desarrollada al transportar un culombio de un conductor a otro, cuando este transporte se efectúa en condiciones tales que no altere la diferencia de potenciales entre los conductores.

* Más adelante (955) hallaremos medios distintos del empleo de la pila : por ejemplo, el juego de un electróforo (920) o de una máquina electroestática cualquiera.

773. **Diferencia de potenciales entre dos puntos de un conductor recorrido por una corriente.** — **Ley de Ohm relativa a una porción de circuito.** — 1º *Experimento.* — Supongamos un alambre A B (fig. 766) recorrido por una corriente en el sentido de la flecha. Unamos el punto A al vástago y el punto B, a la caja de un electroscopio y veremos que las láminas de éste divergen, cargadas positivamente. El potencial de A es, pues, más elevado que el de B. La divergencia de las láminas aumenta si se aparta el punto B del A, es decir, si se aumenta la

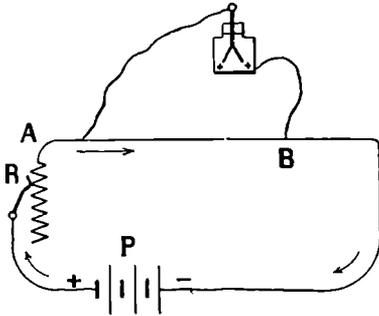


Fig. 766.

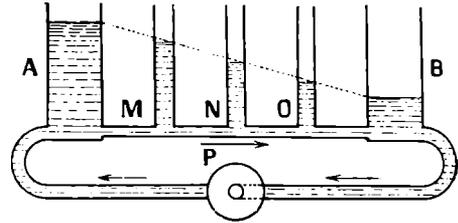


Fig. 767.

resistencia entre A y B, sin variar la intensidad de la corriente. También aumenta si se aumenta, con un reóstato R, la intensidad de la corriente.

2º *Analogía hidráulica.* — Una bomba P (fig. 767) comunica por su tubo de aspiración con un vaso B y por el de impulsión, con otro vaso A. Además, estos vasos comunican entre sí, por un tubo MNO, en el que se ramifican tubos verticales. La bomba establece una circulación de agua : y se observa que el nivel está más alto en A que en B.

Además, en los tubos verticales, el agua se eleva a niveles intermedios entre los de A y B, presentando, entre los diversos puntos del tubo MNO, *diferencias de presión* análogas a las diferencias de potenciales que existen entre los puntos de un conductor recorrido por una corriente.

3º **LEY DE OHM RELATIVA A UNA PORCIÓN DE CIRCUITO.** — *La diferencia*

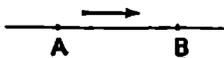


Fig. 768.

de potenciales V que existe entre dos puntos A y B (fig. 768) de un conductor recorrido por una corriente se obtiene, en voltios, multiplicando la intensidad i de la corriente por la resistencia r de la porción del

conductor comprendida entre los dos puntos considerados.

Por consiguiente,

$$V = ri.$$

En efecto, supongamos que la corriente i pase durante el tiempo t . Como el potencial de A es superior al de B, según nos enseñan los experimentos, la cantidad de electricidad $q = it$, que pasa de A a B, debe desprender una cantidad de energía $Vq = Vit$ julios, designando por V la diferencia de potenciales desconocida que existe entre A y B. Sabemos que en la porción de alambre AB se desprende una cantidad de energía calorífica igual a ri^2t julios y que no se produce ningún otro

fenómeno de desprendimiento ni de absorción de energía. Luego tendremos :

$$Vit = ri^2t; \quad \text{de donde} \quad V = ri.$$

774. Aplicaciones de la ley de Ohm. — La ley de Ohm referente a una porción de circuito, permite calcular la intensidad de la corriente que circula en un alambre de resistencia conocida cuando se establece entre sus extremos una diferencia de potenciales también conocida :

La intensidad i de la corriente se obtiene dividiendo la diferencia de potencial V entre los extremos del alambre, por la resistencia r de éste.

En efecto, la intensidad i de la corriente debe ser tal que se tenga :

$$V = ri, \quad \text{de donde} \quad i = \frac{V}{r}.$$

Por ejemplo, en una instalación eléctrica urbana, los extremos A y B (fig. 769) de los dos alambres que recibe un abonado comunican con los dos polos de la dinamo generatriz que mantienen entre A y B una diferencia de potencial constante de 110 voltios. Si, entre ellos, se sitúa un conductor, tal como una lámpara eléctrica de 200 ohmios, pasará por ellos una corriente de $110 : 200 = 0,55$ amperios.

Se ve que la corriente es la misma que si se dispusiera de un generador de 110 voltios de fuerza electromotriz y de resistencia interior despreciable.

Cortacircuitos. — Obsérvase también que si, entre los puntos A y B, se intercala un alambre de poca resistencia, pasará una corriente intensa, capaz de fundir el alambre. Este fenómeno constituye el *cortacircuito*.

Potencia consumida por una porción de circuito. — La potencia consumida en una porción de circuito se calcula en vatios, efectuando el producto de la diferencia de potenciales que existe entre los extremos del alambre, por la intensidad de la corriente.

En efecto, en virtud de la misma definición de la diferencia de potenciales, la corriente que produce i culombios, por segundo, comunica al circuito un trabajo de Vi julios. La potencia consumida es pues,

$$W = Vi \text{ vatios.}$$

Y, en t segundos, la energía empleada por la corriente en el circuito es :

$$E = Vit \text{ julios.}$$

En la práctica, esta energía se expresa muy a menudo en hectovatios horas.

775. Diferencia de potenciales entre los polos de un generador de corriente en circuito abierto. — Supongamos una pila (fig. 726) o un generador cualquiera de corriente, de resistencia interior r' , de fuerza electromotriz e y cuyos polos P y P' estén unidos por un alambre de resistencia r . La pila produce una corriente de intensidad i . La diferencia

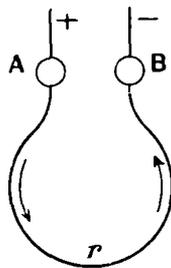


Fig. 769.

de potenciales entre los polos es la diferencia de potenciales V que existe entre los extremos del alambre PP' de resistencia r , recorrido por la corriente i . Luego

$$V = ir.$$

Pero $i = \frac{e}{r + r'}$ (767), por lo tanto

$$V = \frac{re}{r + r'}.$$

1º Se ve que V es siempre menor que la fuerza electromotriz e . La diferencia de potenciales que existía, en circuito abierto, entre los polos de un generador de corriente disminuye, pues, al cerrar el circuito.

2º Si la resistencia interior r' es despreciable ante la resistencia exterior r , tendremos sensiblemente $V = \frac{re}{r} = e$.

3º Dividamos los dos términos de la fracción precedente por r , y resultará

$$V = \frac{e}{1 + \frac{r'}{r}}.$$

Si r aumenta indefinidamente, V tiende hacia e . V será igual a e cuando el generador esté en circuito abierto, porque, en este caso, r puede considerarse como infinita. Este resultado era de esperar, puesto que, *por definición*, se ha tomado la diferencia de potenciales entre los polos de un generador, en circuito abierto, igual a su fuerza electromotriz.

776. Descenso del potencial a lo largo de una porción de circuito que comprende una fuerza electromotriz. — Supongamos que una porción de circuito $A B$ (fig. 768), de resistencia total r , esté recorrida por una corriente de intensidad i , y que entre los puntos A y B , haya también un generador de corriente de fuerza electromotriz e , atravesado por la corriente de su polo negativo, hacia su polo positivo. Durante el tiempo t , la energía calorífica desprendida es ri^2t ; pero, como el generador produce una energía eit , el trabajo de la corriente no es más que

$$\mathcal{C} = ri^2t - eit;$$

y la diferencia de potenciales entre A y B es sólo

$$\frac{\mathcal{C}}{q} \quad \text{o} \quad \frac{\mathcal{C}}{it}, \quad \text{es decir que} \quad V = ri - e.$$

Si, al contrario, entre A y B hubiese un aparato receptor, éste absorbería energía en vez de darla. Puede emplearse la misma fórmula, llamando siempre e al valor algebraico de la fuerza electromotriz intercalada entre A y B ($e > 0$ para un generador, $e < 0$ para un receptor).

777. Empleo de un reóstato en derivación. — Potenciómetros. — Para someter un circuito a una fuerza electromotriz variable a voluntad,

se emplea con frecuencia el aparato siguiente. Entre los polos A y B (fig. 770) de un generador de corriente, intercalase un reóstato. Entre dos puntos, uno M, fijo, y otro N, móvil, tomado en este reóstato, se coloca, en derivación, el circuito C por el cual se quiere hacer pasar una corriente. Si llamamos i a la intensidad de la corriente que recorre el reóstato, y r a la resistencia de la porción de este reóstato comprendida entre M y N, todo ocurrirá en el circuito C como si éste estuviera unido a un generador de resistencia interior nula y de fuerza electromotriz ri . Esta fuerza electromotriz varía gradualmente, si se aleja de M el contacto móvil N.

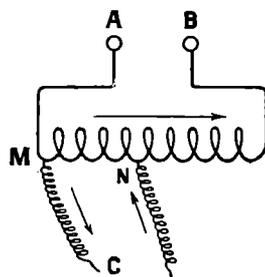


Fig. 770.

Este aparato se denomina generalmente *potenciómetro*, porque sirve también para las medidas de fuerzas electromotrices (786) o de diferencias de potenciales.

778. Diferencia de potenciales al contacto de dos conductores. — Cuando se ponen en contacto dos conductores de naturaleza diferente, establécese entre ellos una diferencia de potenciales. La experimentación demuestra que una lámina de cinc y otra de cobre puestas en contacto, se cargan de electricidad de signos contrarios.

PRINCIPIO DE VOLTA. — Si se hallan en contacto y en equilibrio eléctrico dos cuerpos presentan, a temperatura dada, una diferencia de potenciales característica del par, la cual es independiente de la forma y del volumen de los cuerpos, así como de la extensión de la superficie de contacto y del potencial inicial a que se puede mantener uno de los cuerpos del par.

LEY DE VOLTA. — La diferencia de potenciales que existe entre dos metales, separados por una cadena de metales intermedios, es la misma que si aquellos dos metales estuviesen en contacto, con tal que la temperatura sea igual en todos los puntos de la cadena.

De donde se deduce que si dos porciones de un mismo metal forman los dos extremos de una cadena cuyos elementos intermedios están formados por metales cualesquiera, tienen el mismo potencial.

Caso de los líquidos. — La ley de Volta no se aplica a los líquidos electrolitos. Si dos porciones del mismo metal se hallan separadas por una cadena de conductores, algunos de los cuales sean líquidos, pueden no tener el mismo potencial. Esta es la razón de hallarse en distintos potenciales los dos polos de las pilas, aun cuando estén formados por un mismo metal.

Experimentos de Pellat. — A menudo, se admite que la diferencia de potenciales entre un electrolito y un metal es muy pequeña. Pellat ha deducido de sus experimentos sobre esto, que la diferencia de potenciales entre un metal y una solución de una de sus sales en que se halle sumergido es nula.

Teoría de Nernst. — Pero, algunos autores, y en especial Nernst, no admiten la exactitud de las leyes precedentes. Nernst, cree, al contrario, que la diferencia de potenciales se produce al contacto de un electrodo y del electrolito que lo baña.

779. Fenómenos electrocinéticos. — En este nombre van comprendidos los dos fenómenos recíprocos siguientes :

Fuerza electromotriz de filtración. — Cuando un electrolito filtra a través de los poros de un diafragma aislador, o a través de un tubo capilar aislador, se observa entre las dos masas de líquido separadas por el diafragma o el tubo, una diferencia de potencial E , proporcional a la diferencia de presión P que ha provocado la filtración (Quincke). Esta diferencia de potenciales mide la fuerza electromotriz de filtración.

Osmosis eléctrica. — Si, inversamente, siendo igual la presión del dia-

fragma y del tubo capilar, se establece, entre las dos masas del electrólito, una diferencia de potenciales, al mismo tiempo que se establece una corriente (en el sentido de los potenciales decrecientes), el líquido se mueve sea en el sentido de la corriente, sea en sentido inverso según los casos. Este fenómeno, descubierto por Porret, constituye la ósmosis eléctrica. El gasto del líquido Φ (masa de líquido transportada durante la unidad de tiempo) es proporcional a la intensidad I de la corriente eléctrica.

Helmholtz ha demostrado que los cocientes $\frac{E}{P}$ (en el caso de la fuerza electromotriz de filtración) y $\frac{\Phi}{I}$ (en el caso de la ósmosis eléctrica) son iguales y que se tiene

$$\frac{E}{P} = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mathcal{M}}{\gamma \eta},$$

γ es la conductividad del electrólito y η un coeficiente, que depende del electrólito solo y que es su coeficiente de viscosidad. El coeficiente \mathcal{M} depende también de la naturaleza de la pared aisladora, pero no de su forma ni de sus dimensiones. Por otra parte \mathcal{M} es igual a la diferencia de potenciales entre el aislador y el electrólito, multiplicada por $\frac{1}{4\pi}$.

Según Perrin el coeficiente \mathcal{M} depende, en magnitud y signo, de la alcalinidad o de la acidez del líquido. Grumbach ha observado que la introducción de sustancias solubles no conductoras, tales como el fenol, disminuye \mathcal{M} por causa de la formación de una capa más concentrada cerca de la pared.

CAPÍTULO VI

CORRIENTES DERIVADAS. — MEDIDA DE LAS RESISTENCIAS Y DE LAS FUERZAS ELECTROMOTRICES

CORRIENTES DERIVADAS

780. **Corrientes derivadas. — Leyes.** — Hasta ahora, hemos supuesto que la corriente transmitida por un generador, recorre un circuito único. Pero, en muchos casos, no sucede así. Por ejemplo, en la distribución de la corriente eléctrica a las diversas lámparas de una instalación, los alambres que están en comunicación respectiva con los polos de la dinamo o de la batería de acumuladores concurren en dos puntos A y B (fig. 771). Cada lámpara se instala en alambres diferentes que unen a A y B. La corriente suministrada por el generador se distribuye

por las diferentes lámparas. En realidad, para mayor comodidad, los dos alambres PA y P' B, cuya resistencia es despreciable, corren a lo largo de la instalación (fig. 772), y se pone cada lámpara en derivación entre los dos puntos más próximos a los cables, tales como A, B; A', B'; A'', B''.

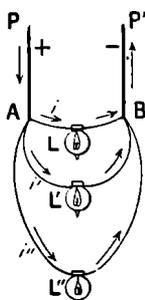


Fig. 771.

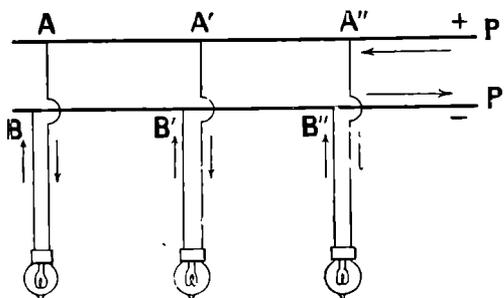


Fig. 772.

Las corrientes que alimentan las lámparas se denominan *corrientes derivadas* y se dice que las lámparas están *montadas en derivación*.

La experimentación ha establecido las leyes siguientes :

1ª *La intensidad de la corriente es la misma en todos los puntos del circuito, fuera de la derivación.*

2ª *La intensidad de la corriente en el circuito principal es la suma de las intensidades en los circuitos derivados.*

En efecto, hagamos pasar la corriente transmitida por una pila (o mejor, por una batería de acumuladores) PP' (fig. 773), a través de los vasos electrolíticos V, V', v, v', que contienen una solución de nitrato de plata, hallándose v y v' en dos derivaciones que parten de los puntos A y B; V, en la porción PA y V', en la P'B del circuito, fuera de la derivación. El

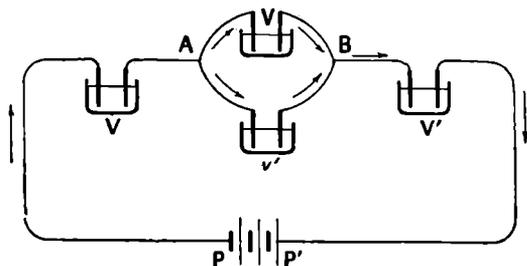


Fig. 773.

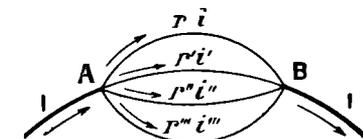


Fig. 774.

experimento prueba que cuando la corriente circula durante cierto tiempo : 1º la masa de plata depositada es la misma en V que en V'; 2º esta masa es la suma de las masas depositadas en v y v'.

El mismo experimento puede repetirse con cualquier número de derivaciones.

Sean I la intensidad en el circuito principal, e i, i', i'', i''' ..., las intensidades en los circuitos derivados (fig. 774), tendremos :

$$[1] \quad I = i + i' + i'' + i''' + \dots$$

3ª *Relación entre las intensidades en las derivaciones.* — Sean r, r', r'' ,

r''' las resistencias de los alambres derivados. La diferencia de potenciales entre A y B puede expresarse por los productos ri , $r'i'$, $r''i''$, $r'''i'''$ Estos productos son, pues, iguales, y tendremos :

$$[2] \quad ri = r'i' = r''i'' = r'''i''' = \dots$$

Caso particular de dos derivaciones. — Comparemos las intensidades en dos de las derivaciones, de resistencias r y r' ; y, designando por i e i' las intensidades en estos dos alambres, tendremos :

$$ri = r'i'; \quad \text{de donde} \quad \frac{i}{i'} = \frac{r'}{r}.$$

Luego : *las intensidades de las corrientes en los alambres de derivación son inversamente proporcionales a las resistencias de estos alambres.*

4º Conductor equivalente a varias derivaciones. — Llámase conductor equivalente al conjunto de derivaciones establecidas entre A y B (fig. 774) a un conductor tal que, introducido entre A y B, no alterase la intensidad de la corriente en el circuito principal. De este modo, él mismo estaría recorrido por la corriente I . Sea x su resistencia. La diferencia de potenciales entre A y B será xI y conservará el valor que tenía con el sistema de derivaciones. Luego :

$$\begin{aligned} \text{De donde :} \quad xI &= ri; & xI &= r'i'; & xI &= r''i'' \dots \\ & i = \frac{xI}{r}; & i' &= \frac{xI}{r'}; & i'' &= \frac{xI}{r''}. \end{aligned}$$

Llevando a la ecuación [1] estos valores y simplificando, tendremos

$$1 = \frac{x}{r} + \frac{x}{r'} + \frac{x}{r''} + \dots \quad \text{de donde} \quad \frac{1}{x} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r'} + \frac{1}{r''} + \dots$$

Este resultado puede enunciarse así :

La conductancia (765) de un sistema de conductores derivados es igual a la suma de las conductancias de estos conductores.

Se ve que añadiendo derivaciones se aumenta la conductancia y que, por consiguiente, se disminuye la resistencia del conjunto. Mientras que si se colocan conductores en serie, se suman sus resistencias.

781. Ventajas e inconvenientes de las distribuciones en derivación.

— **Distribuciones en serie.** — La distribución de corrientes en derivación en los aparatos receptores (lámparas, motores) hace sensiblemente independientes estos aparatos, de modo que se puede establecer o interrumpir la corriente en uno de ellos sin ejercer influencia en los demás. Pero la intensidad de la corriente en el circuito principal, que es la suma de las intensidades de la corriente en cada aparato, se vuelve muy grande en las instalaciones importantes. La cantidad de calor desprendida en los conductores principales, por aumentar proporcionalmente al cuadrado de la intensidad de la corriente, constituye una pérdida importante de energía. No se la puede reducir sino aumentando la sección de los conductores de distribución que, entonces, se vuelven muy costosos.

Distribución en serie o en tensión. — En este modo de distribución se disponen los aparatos receptores, las lámparas, por ejemplo, a continuación unos de otros en el mismo circuito (fig. 775). Es evidente que, de este modo, si llegase a romperse un alambre, la corriente quedaría interrumpida en todas partes y se apagarían las demás lámparas.

En cambio, la intensidad de la corriente en el circuito principal es igual que en cada lámpara. Por lo tanto, la cantidad de calor perdida en los conductores es pequeña; pero, como la resistencia del circuito es la suma de las resistencias de cada lámpara, el generador debe tener una fuerza electromotriz proporcional al número de lámparas. Entonces, se dice que la corriente es de *alta tensión*. El aislamiento de los alambres PA y P'B se vuelve más difícil y la falta de aislamiento podría ocasionar incendios. Además, si se tocan los extremos AB de los alambres principales, pueden ocurrir accidentes mortales.

Nunca se distribuye a los particulares corrientes con tensión muy superior a 100 voltios (110 o 120 voltios a lo sumo). En los tranvías y en el alumbrado público se llega a 500 y 600 voltios (en este caso, las lámparas están agrupadas por series de cinco, dispuestas a su vez en derivación en el circuito principal).

Comparación de las pérdidas de energía en los dos sistemas de distribución. — La misma cantidad de energía eléctrica puede ser transportada, bien por una corriente intensa de un generador de poca fuerza electromotriz, bien por una corriente poco intensa de una máquina de alto voltaje. De este modo, un generador de 100 voltios, que produzca una corriente de 100 amperios, transmite la misma energía (10 000 julios por segundo) que otro generador de 10 000 voltios de fuerza electromotriz, que produzca una corriente de un amperio. Pero, este último medio de transportar es más económico, porque, en igualdad de circuito, supone una pérdida de calor 10 000 veces menor que el primero. Mejor dicho, si se quiere transportar la energía empleando un circuito que no absorba sino una fracción determinada de energía, el sistema de poca intensidad requiere un circuito de alambre mucho más delgado que el sistema de gran intensidad; luego es más económico.

OBSERVACIÓN. — Las corrientes alternas permiten, por medio de *transformadores* (871), producir corriente eléctrica de alta tensión y disminuir ésta para su uso: de esta manera, se puede transportar la energía eléctrica a gran distancia sin perder mucho en forma de calor desprendido en los conductores.

782. **Shunt.** — Con frecuencia, ocurre que no se puede transmitir a un aparato sino una fracción de la corriente total producida por un generador, que es lo que sucede, por ejemplo, con el empleo de los galvanómetros sensibles (842).

Para esto, entre los bornes A y B (fig. 776) adonde llegan los extremos del alambre del aparato y que se ponen en comunicación con los polos del generador, se intercala un conductor AB. La corriente se reparte entre los dos circuitos AB y AGB. Sean i e i' las intensidades de las corrientes derivadas

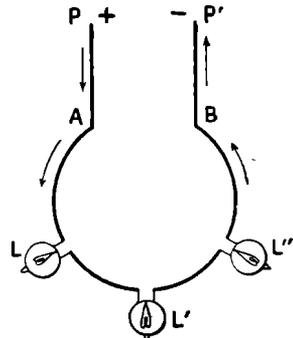


Fig. 775.

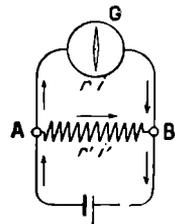


Fig. 776.

AGB y AB y sea I la intensidad en el circuito principal. Tenemos :

$$ri = r'(I - i); \quad \text{de donde} \quad i = I \frac{r'}{r + r'} = \frac{I}{\frac{r}{r'} + 1}.$$

Si, por ejemplo, la resistencia r' de la derivación es 9 veces menor que la resistencia r del aparato ($\frac{r}{r'} = 9$), la corriente, en AGB, será 10 veces menos intensa que la corriente principal. Del mismo modo, si r' es $1/99$ o $1/999$ de r , la corriente, en G, tendrá una intensidad igual a la $1/100$ o $1/1000$ parte de la corriente principal.

783. **Comparación de las resistencias. — Puente de Wheatstone.** — La comparación de las resistencias de dos conductores se hace generalmente mediante el aparato conocido con el nombre de *punte de Wheatstone*, que está basado en el principio siguiente.

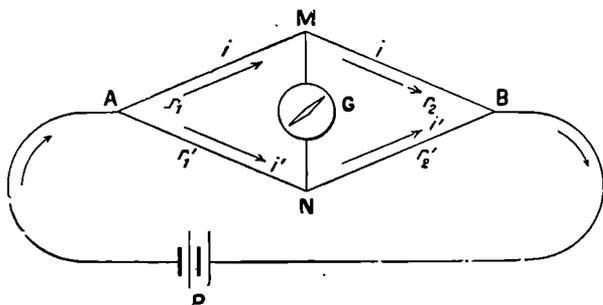


Fig. 777.

Supongamos que la corriente de una pila P (fig. 777) se reparte entre dos derivaciones AMB, ANB. Si se unen dos puntos M y N, tomados sobre cada una de las derivaciones, por un circuito o *punte MN*, que comprenda un galvanómetro G, este circuito será, en general, recorrido por una corriente y el galvanómetro se desviará. Pero, si la relación que existe entre las resistencias de las porciones AM y MB iguala a la relación de las resistencias de AN y NB, no pasará ninguna corriente.

Supongamos que la corriente de una pila P (fig. 777) se reparte entre dos derivaciones AMB, ANB. Si se unen dos puntos M y N, tomados sobre cada una de las derivaciones, por un circuito o *punte MN*, que comprenda un galvanómetro G, este circuito será, en general, recorrido por una corriente y el galvanómetro se desviará. Pero, si la relación que existe entre las resistencias de las porciones AM y MB iguala a la relación de las resistencias de AN y NB, no pasará ninguna corriente.

Demostración. — La intensidad de la corriente es la misma en AM y en MB; puesto que no se produce ninguna derivación en M. Sea i esta intensidad. Asimismo, sea i' la intensidad en las dos porciones AN y NB. Sean r_1, r_2, r'_1, r'_2 , las resistencias de las cuatro porciones de circuito AM, MB, AN, NB. Ya que en MN no hay ninguna corriente, el potencial de M será el mismo que el de N. La diferencia de potenciales entre A y M es, pues, igual a la diferencia de potenciales entre A y N.

Luego $r_1 i = r'_1 i'$.
Del mismo modo, la diferencia de potenciales entre M y B es igual a la diferencia de potenciales entre N y B y tendremos $r_2 i = r'_2 i'$.

Luego

$$r_1 i = r'_1 i'.$$

Del mismo modo, la diferencia de potenciales entre M y B es igual a la diferencia de potenciales entre N y B y tendremos

$$r_2 i = r'_2 i'.$$

Dividiendo miembro a miembro las dos ecuaciones, resulta

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r'_1}{r'_2}.$$

Instalación de un puente de Wheatstone. — Entre los diversos modos de instalar un puente de Wheatstone, citaremos el siguiente :

La porción AM (fig. 778) está formada por la resistencia x que se trata de medir (un carrete de alambre conductor, por ejemplo, cuyos extremos estén unidos a A y M por alambres de cobre cortos y gruesos y de resistencia despreciable). En MB se coloca una resistencia, r , por ejemplo. Finalmente, AB es un alambre metálico muy regular y homogéneo. En N se coloca un contacto que pueda resbalar a lo largo del alambre. Únense M y N por un circuito que contenga un galvanómetro G. Se mueve el contacto N hasta que el galvanómetro no indique corriente alguna. La relación de las resistencias de AM y MB queda dada por la relación de las resistencias de AN y NB, es decir, por la relación de las longitudes de estas porciones de alambre. Luego.

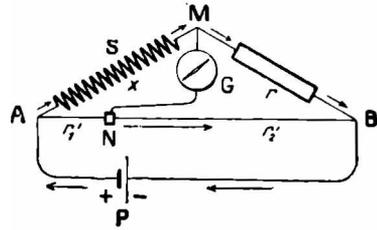


Fig. 778.

$$\frac{x}{r} = \frac{AN}{NB}; \quad \text{de donde} \quad x = r \frac{AN}{NB}.$$

Para medir AN y NB, se coloca, debajo del alambre, una regla graduada en milímetros.

784. Cajas de resistencias. — Las resistencias conocidas que se aplican a MB (fig. 778) se hallan, generalmente, contenidas en cajas llamadas *cajas de resistencias* (fig. 779), que comprenden una serie formada como las series de pesas de las cajas de pesas.

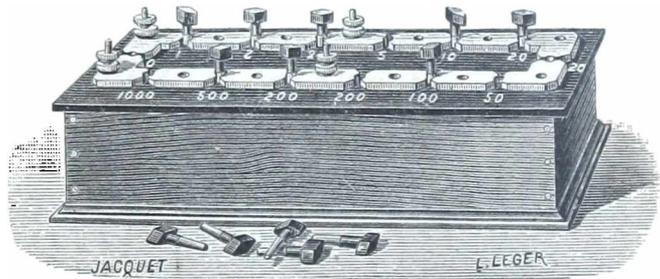


Fig. 779.

Las resistencias son carretes construidos con una aleación cuya resistencia varía muy poco con la temperatura (maillachort, manganina, constantano).

Los extremos de los hilos de estos carretes llegan a unos soportes de latón, de resistencia completamente despreciable y que se reúnen por medio de fichas E (fig. 780) : *al quitar una ficha, se introduce un carrete en el circuito.*

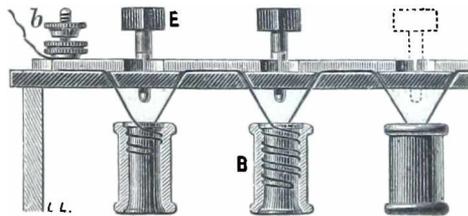


Fig. 780.

Para medir una resistencia x por el método del puente de Wheatstone, se puede también aplicar el contacto N al centro de ANB y, mediante una caja de resistencias colocada en r (fig. 778), variar la resistencia r hasta que el galvanómetro vuelva al cero. Entonces, la resistencia de la caja es igual a la resistencia desconocida. También se puede reemplazar las dos porciones AN y NB del alambre por dos cajas de resistencias. Ciertas cajas de resistencias, denominadas *cajas de puente*, presentan, reunidas

con comunicaciones que realizan esta disposición, las tres resistencias MB, AN, NB.

785. **Determinación de la resistencia de los líquidos.** — Se puede aplicar el método del puente de Wheatstone a la medida de la resistencia de una columna de líquido comprendida entre dos electrodos; pero, no, con la corriente *continua* de una pila. En efecto, esta corriente descompondría el líquido y produciría en los electrodos fenómenos de polarización (742) que introducirían fuerzas electromotrices capaces de hacer casi imposibles las medidas. En este caso, empleáanse las corrientes *alternas* de un pequeño carrete de Ruhmkorff (875). Se sustituye el galvanómetro G por un teléfono (1035) y se hace resbalar el contacto N hasta que el teléfono quede en silencio, lo cual indica el cero.

Este método permite comparar entre sí dos resistencias líquidas, o bien una resistencia líquida a una resistencia de un alambre. Se aplica asimismo a los sólidos y ofrece la ventaja de poder sustituir el galvanómetro por un teléfono, aparato menos costoso e igualmente sensible.

Experimentos de Maneuvrier. — *Adulteración de los vinos.* — Este interesante aparato, debido a Kohlrausch, permite, aparte de sus aplicaciones puramente científicas, reconocer rápidamente si un líquido alimenticio está adulterado por adición de sustancias extrañas solubles, capaces de variar en gran proporción la resistencia eléctrica. Maneuvrier lo ha aplicado particularmente para instituir un método de análisis rápido y seguro, para reconocer y medir la adulteración de los vinos*.

786. **Comparación de las fuerzas electromotrices de dos pilas.** — Para comparar entre sí las fuerzas electromotrices de dos pilas se instala en el circuito de una pila o de una batería de pilas auxiliares E (fig. 781) una caja de resistencia R y un alambre perfectamente

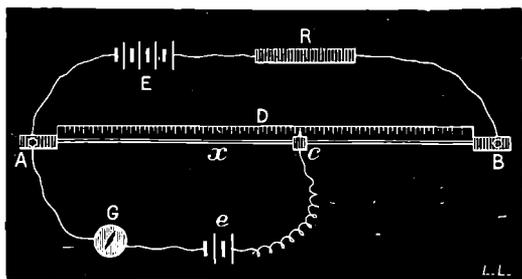


Fig. 781.

homogéneo AB. Un segundo circuito que comprende una de las pilas que se trata de comparar, de fuerza electromotriz e y un galvanómetro G está cerrado por una porción r de resistencia del alambre AB. Muévase la correa c de modo que el galvanómetro se ponga en el cero, lo cual supone que la corriente derivada en el galvanómetro es de sentido contrario al que suministra e . Si la intensidad de la corriente en AB es entonces I , se tiene evidentemente

$$e = Ir,$$

siendo r la resistencia del segmento $Ac = x$ cuando el galvanómetro está a cero. En efecto, el descenso del potencial Ir entre A y e iguala a la fuerza electromotriz de la pila; puesto que no hay ninguna corriente en el circuito AGE (776).

Se repite el mismo experimento con otra pila e' , y, para llevar el galvanómetro al cero, es preciso colocar la correa c a la distancia x' de A; siendo r' la resistencia de x' , tendremos .

$$e' = Ir', \quad \text{de donde} \quad \frac{e'}{e} = \frac{r'}{r}.$$

Pero

$$\frac{r'}{r} = \frac{x'}{x}, \quad \text{luego} \quad \frac{e'}{e} = \frac{x'}{x}.$$

Las longitudes x y x' se leen en una regla fija cerca de AB.

OBSERVACIONES. — 1ª Si se quiere evitar el que pase una corriente capaz de polarizar la pila e , conviene reemplazar el galvanómetro por un electrómetro capilar (948).

2ª La pila e puede ser un tipo de fuerza electromotriz.

En cuanto a las fuerzas electromotrices de estos tipos, han sido determinadas en valor absoluto por otros métodos (849).

* *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, Agosto 1904.

CAPÍTULO VII

ELECTROMAGNETISMO

CAMPOS MAGNÉTICOS DE LAS CORRIENTES

787. **Acción de las corrientes sobre los imanes.** — Ya hemos visto que si se coloca un alambre conductor de una corriente cerca de una aguja magnética, por ejemplo, paralelamente a su posición de equilibrio, dicha aguja se desvía y adopta una nueva posición de equilibrio que se aparta de la primera tanto más cuanto mayor es la intensidad de la corriente (714). Tan importante descubrimiento fué realizado, en 1820, por Ørstedt, físico de Copenhague, y demuestra que una corriente crea en torno suyo un campo magnético cuya acción se superpone a la del campo terrestre.

Esta acción de una corriente sobre un imán fué determinada por Ampère, en un enunciado que se denomina *regla de Ampère*.

REGLA DE AMPÈRE. — 1º *El polo norte de un imán colocado cerca de una corriente AB (fig. 782) se halla solicitado por una fuerza dirigida hacia la izquierda de un observador que se sitúase en la corriente, entrándole ésta por los pies y saliendo por la cabeza, y que mirase al polo del imán (observador de Ampère).*

2º *El campo magnético producido en un punto M (fig. 784) por una corriente rectilínea AB, se dirige perpendicularmente al plano que pasa por la corriente y por el punto.*

788. **Campo magnético de una corriente rectilínea.** — **Estudio experimental.** — Tomemos una aguja magnética muy pequeña ns (fig. 782), suspendida de un hilo de seda cuya torsión ejercerá una influencia despreciable, y coloquemos un

alambre rectilíneo largo, recorrido por la corriente, a una distancia del imán suficientemente grande para que puedan considerarse como despreciables las dimensiones de éste.

1º Notaremos que el imán se desvía, sea cual fuere la posición del conductor, excepto cuando este último se halle en un plano perpendicular a la línea de los polos del imán y que pase por el centro de éste (fig. 783).

De ahí se deduce que el campo magnético producido en el punto en que se encuentra la aguja está en la dirección de ésta y, por consiguiente,

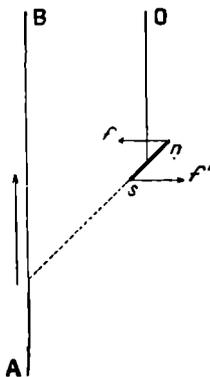


Fig. 782.

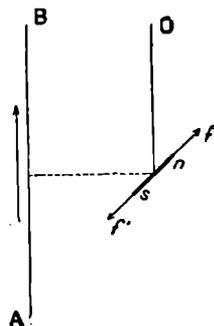


Fig. 783.

es perpendicular al plano que pasa por la corriente y por el punto considerado.

Si la corriente se halla en el meridiano magnético de la aguja (fig. 782) y es suficientemente intensa para que se pueda despreciar la acción del campo terrestre, comparada con la suya, el imán se coloca *en cruz con la corriente*, desviándose el polo norte *hacia la izquierda de esta corriente*.

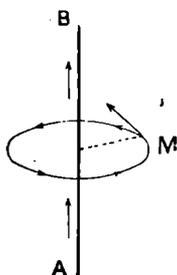


Fig. 784.

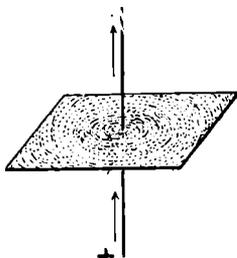


Fig. 785.

789. **Líneas de fuerza del campo.** — Según esto, ya que en cada punto M, la fuerza tiene que ser perpendicular al plano de AB y de M (fig. 784), cualquier *línea de fuerza* del campo de la corriente será una cir-

cunferencia cuyo plano es perpendicular a la corriente y cuyo centro se halla en esta última.

Fantasmas magnéticos. — El experimento del fantasma magnético confirma lo que precede. Para efectuarlo, hácese atravesar al alambre conductor vertical un cartón horizontal espolvoreado con limaduras de hierro (fig. 785). Produciendo ligeros choques en el cartón, se ve que la limadura se coloca formando circunferencias concéntricas a la corriente.

La regla de Ampère indica el sentido de estas líneas de fuerza.

790. **Caso de un circuito cerrado que rodea al imán.** — **Corriente circular.** — En el caso de un circuito curvo (fig. 786), se puede admitir que la acción sobre una aguja magnética resulta de la acción ejercida por las diversas partes del circuito. Si este último rodea a la aguja imantada, la regla de Ampère demuestra que todas las acciones de las diversas partes del conductor se hallan en la misma dirección y en igual sentido, por lo tanto, se suman. El caso más sencillo es el de un circuito circular (fig. 786).

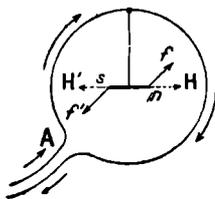


Fig. 786.

Se multiplica la acción de la corriente formando varias espiras, aisladas unas de otras. De este modo se puede estudiar fácilmente la forma de las líneas de fuerza del campo magnético, disponiendo un cartón espolvoreado con limaduras de hierro, como indica la figura 787. Se ve que las líneas de fuerza son líneas cerradas que comprenden la corriente. Su sentido queda determinado por la regla de Ampère.

Analogía entre una corriente circular y una placa magnética. — El campo de una corriente circular tiene líneas de fuerza dispuestas exactamente como las de una lámina de acero en que una de las caras esté constituida por polos norte y la otra, por polos sur. Semejante imán *denominase placa magnética*.

Por analogía con el sistema, llamaremos *cara norte* de la corriente,

a la cara por donde salen las líneas de fuerza, y cara sur, a la cara por donde estas entran. En la figura 787, la cara norte está delante.

Se ve fácilmente que la cara norte está situada hacia la izquierda de

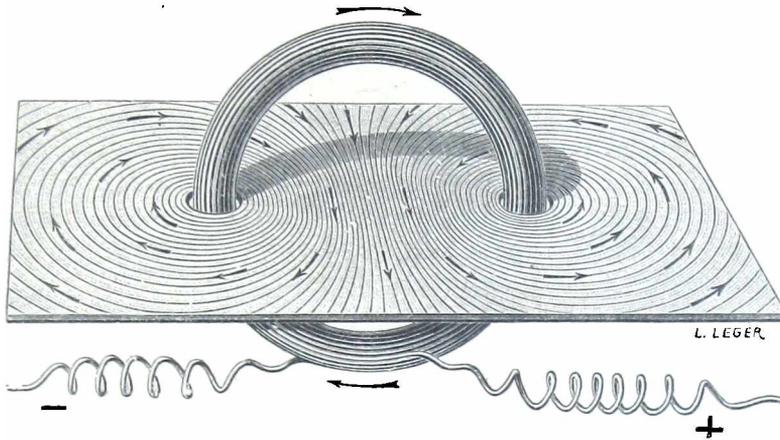


Fig. 787.

un observador de Ampère, colocado en cualquier parte de la corriente y mirando al centro de está.

791. **Campo magnético de un carrete.** — **Solenoides.** — Uno de los casos más importantes es el de un carrete de espiras enrolladas regularmente, aisladas unas de otras, y recorrido por una corriente.

Se puede formar el fantasma magnético de este sistema disponiendo un cartón como indica la figura 788. Se ve que las líneas de limadura se colocan paralelamente al interior del carrete.

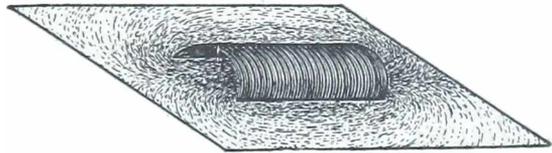


Fig. 788.

Fuera del carrete, las líneas de fuerza se curvan y se unen.

Ampère dió el nombre de *solenoides* a semejante carrete. La figura teórica 789 representa, con su sentido, las líneas de fuerza del campo de un solenoide. Es la interpretación del fantasma magnético de la figura 788.

Analogías de un solenoide y de un imán. — La simple inspección del espectro magnético de un solenoide indica una analogía chocante con el de una barra imantada rectilínea (fig. 705). La experimentación demuestra que un solenoide presenta, en efecto, las propiedades de una barra imantada que

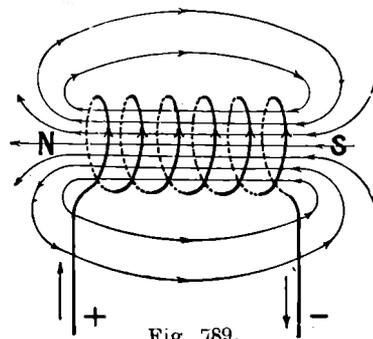


Fig. 789.

tuviese su polo norte en el extremo N, de donde salen las líneas de fuerza, y su polo sur, en el extremo opuesto S, donde entran.

Fácilmente se conoce *a priori* los polos de un solenoide, por la regla siguiente, que está de acuerdo con la figura 789 : *El polo norte de un solenoide se halla en el extremo situado a la izquierda de un observador de Ampère, colocado en una espira cualquiera del solenoide (de modo que la corriente le penetre por los pies y le salga por la cabeza) y que mire hacia el interior de éste.*

Acción de un solenoide sobre un imán. — Si se acercan a una aguja magnética los polos de un solenoide sujeto por la mano, se observará que el polo norte del solenoide rechaza el polo norte de la aguja y atrae su polo sur; mientras que el polo sur del solenoide atrae el polo norte de la aguja y rechaza al polo sur. Luego *un solenoide actúa sobre un imán como hubiera actuado otro imán.*

792. **Intensidad del campo magnético de una corriente.** — Para medir la intensidad del campo magnético de una corriente en un punto,

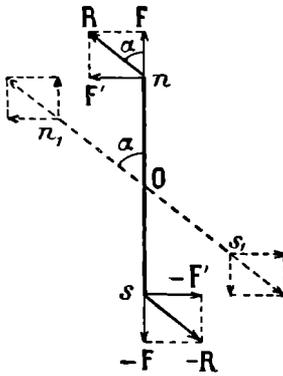


Fig. 790.

se dispone la corriente de modo que el campo magnético de ella sea, en el punto considerado, perpendicular al campo terrestre y se coloca, en este punto, una pequeña aguja magnética. Las fuerzas F' , $-F'$ (fig. 790) que ejerce la corriente tienden a poner la aguja perpendicularmente a su primera posición; las fuerzas F , $-F$ ejercidas por la tierra, tienden, al contrario, a colocarla en el meridiano magnético. La aguja girará un ángulo tanto mayor cuanto más grande sea la intensidad del campo de la corriente. Este ángulo, α , puede medirse por cualquier procedimiento óptico (180) y de su medida se puede deducir la intensidad del campo de la corriente. En

efecto, si H es la intensidad del campo terrestre y H' la intensidad del campo de la corriente, las fuerzas F , $-F$ tienen por intensidad μH (μ masa magnética del polo n), las fuerzas F' , $-F'$ tienen por intensidad $\mu H'$. Luego las fuerzas FF' , aplicadas al polo n , tienen una resultante R , toda vez que las fuerzas $-F$ y $-F'$, aplicadas al polo s tienen la resultante $-R$, paralela, igual y de sentido contrario. La aguja ns se pondrá en equilibrio en $n_1 s_1$ en la dirección de las fuerzas R y $-R$. Luego se moverá formando un ángulo α tal que

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F'}{F} = \frac{\mu H'}{\mu H} = \frac{H'}{H}, \quad \text{de donde} \quad H' = H \operatorname{tg} \alpha.$$

Resultados. — Intercalando un voltámetro de nitrato de plata en el circuito puede medirse al mismo tiempo la intensidad de la corriente en amperios; haciendo variar esta intensidad con un reóstato, se ve que la *intensidad del campo de una corriente en un punto es proporcional a la intensidad de la corriente.*

Ley de Laplace. — Sea μ la intensidad de un polo N (fig. 791) sobre el cual actúa la corriente; λ , la longitud de un *elemento* de la corriente, r ,

su distancia al polo N; ω el ángulo que forma la recta NO con dicha corriente. La acción del elemento λ sobre el polo N es una fuerza aplicada a este polo, perpendicular al plano formado por el elemento de corriente y por el polo, dirigida de acuerdo con la regla de Ampère; la intensidad de esta fuerza es proporcional a la longitud λ y al seno del ángulo ω , y es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r . Se tiene

$$f = \frac{K \mu i \lambda}{r^2} \text{sen. } \omega$$

siendo K una constante e i una magnitud proporcional a la intensidad de la corriente (puesto que la experiencia ha demostrado que f es proporcional a esta intensidad). En el sistema de unidades absolutas, llamado *electromagnético*, se procura que $K = 1$; luego tenemos

$$f = \frac{\mu i \lambda}{r^2} \text{seno } \omega.$$

i es la *intensidad* electromagnética de la corriente.

La intensidad del campo creado por el elemento de corriente en el punto N es la fuerza H que ejerce este elemento sobre la unidad de magnetismo norte colocado en este punto.

Se tiene:
$$H = \frac{i \lambda}{r^2} \text{seno } \omega.$$

793. Definición de la unidad electromagnética de intensidad de corriente. — Sea una corriente circular de radio r cm. (fig. 792); toda porción λ de la corriente produce en el centro un campo $H = \frac{i \lambda}{r^2}$ (puesto que ω es recto).

Si $H = 1$, $\lambda = 1$, $r = 1$, i debe ser también igual a 1. La unidad electromagnética de intensidad de corriente es, pues, *la intensidad de una corriente que circulando en una porción de 1 centímetro de longitud de una corriente circular de 1 centímetro de radio, produzca una fuerza igual a una dina sobre la unidad de magnetismo colocada en el centro.*

Relación con el amperio. — La unidad electromagnética ha sido definida antes que el amperio, que es la *unidad práctica*, y se ha escogido igual a la *décima parte de la unidad electromagnética.*

Más tarde se ha demostrado que en la electrólisis un amperio desprende en un segundo 0,000 1035 de hidrógeno o 0,001 118 de plata. Para mayor comodidad de exposición hemos escogido esta propiedad para definir el amperio (731).

794. Expresión del campo magnético en el centro de una corriente circular. — Sea i la *intensidad* electromagnética de una corriente que

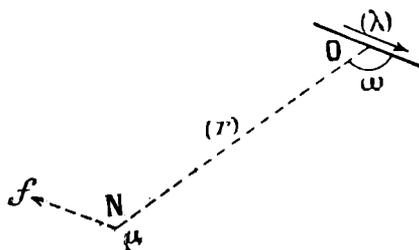


Fig. 791.

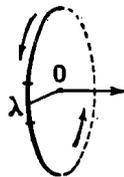


Fig. 792.

pasa por un alambre circular de radio r cm. El campo total será la suma de los campos que produce cada elemento λ , sea

$$H = \frac{i}{r^2} \Sigma \lambda, \quad \text{o} \quad \frac{i}{r^2} \cdot 2\pi r = \frac{2\pi i}{r}.$$

Sea I la intensidad de la misma corriente, expresada en amperios; tendremos evidentemente $I = 10i$, y por consiguiente

$$H = \frac{2\pi I}{10r}.$$

795. Intensidad del campo magnético en lo interior de un carrete ilimitado. — Supongamos un carrete formado por espiras apretadas, que podemos considerar circulares y que posea n espiras por unidad de longitud del carrete. Si éste es muy largo con relación a su diámetro, el experimento y la teoría demuestran que, cuando se hace pasar una corriente I amperios por el carrete, el campo magnético es uniforme en el interior de este carrete, en la región lejana de los extremos. El campo interior tendrá por intensidad

$$H = \frac{4\pi n I}{10}.$$

Demostración. — Sólo examinaremos el campo en un punto del eje del carrete, suponiendo a éste infinitamente largo.

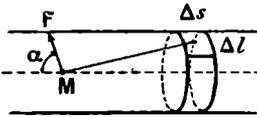


Fig. 793.

Supongamos que en un punto M del eje del carrete (fig. 793), se coloque un polo unidad. Si el carrete contiene n espiras por centímetro de longitud, en una longitud Δs de la generatriz contendrá $n\Delta s$ espiras. Si la corriente que circula por las espiras del carrete es igual a i unidades electromagnéticas de la corriente, la que atraviesa el grupo de espiras $n\Delta s$ tiene por medida $in\Delta s$. Por consiguiente, la acción ejercida por un elemento

de corriente, de longitud $n\Delta s$ y de anchura Δl , en el polo unidad M , es $\frac{in \cdot \Delta s \cdot \Delta l}{r^2}$, siendo r igual a la distancia de Δs a M .

Por razón de simetría, la resultante de las acciones de todas las espiras está dirigida según el eje del carrete. Luego hay que calcular la componente de la acción anterior según este eje. Tiene un valor $\Delta H = \frac{in \cdot \Delta s \cdot \Delta l}{r^2} \cos. \alpha$.

Obsérvese que $\Delta s \cdot \Delta l$ mide el área del rectángulo infinitamente pequeña $\Delta s, \Delta l$. Luego, haciendo $\Delta S = \Delta s \cdot \Delta l$, podremos decir :

$$\Delta H = in \cdot \frac{\Delta S \cos. \alpha}{r^2}.$$

La expresión $\left(\frac{\Delta S \cos. \alpha}{r^2}\right)$ mide el ángulo sólido $\Delta \omega$ bajo el cual se ve, desde M , el área ΔS . Por consiguiente, $\Delta H = in \cdot \Delta \omega$; de donde

$$H = in \cdot \Sigma \Delta \omega.$$

Si el carrete es indefinido, tenemos $\Sigma \Delta \omega = 4\pi$, y, por tanto,

$$H = 4\pi ni = \frac{4\pi n I}{10},$$

si I representa la intensidad de la corriente en amperios.

ACCIONES DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS SOBRE LAS CORRIENTES

796. Acción sobre un elemento de corriente. — Ley de Laplace. —
1º Un elemento rectilíneo de corriente, colocado en un campo magnético se

halla sometido a una fuerza que es a la vez perpendicular a la dirección de la corriente y a la del campo magnético; esta fuerza está dirigida a la izquierda de un observador locado en la corriente, que le recorre de pies a cabeza, y el cual mira en la dirección donde van las líneas de fuerza del campo.

2º Si las líneas de fuerza del campo magnético son paralelas al elemento, este no se halla sometido a ninguna fuerza.

Para establecer experimentalmente estas leyes, tomaremos como elemento de corriente un pequeño alambre rectilíneo horizontal (fig. 794) cuyos extremos encorvados penetran en dos vasitos que contienen mercurio, por los cuales comunican con los polos de una pila. La porción móvil del circuito así realizada se suspende de una balanza sensible y se efectúa la tara en el otro lado. Colócase un fuerte imán de herradura, de manera que la línea de los polos sea perpendicular a la corriente móvil (sabemos que, de este modo, el alambre está en una región en que el campo del imán, dirigido de N hacia S, es casi uniforme). Cuando se hace pasar por el alambre una corriente que tenga el sentido indicado por la flecha, aquél se levanta, sin someterse a ninguna translación horizontal. De donde se deduce que, en este caso, está sometido a una fuerza vertical de abajo arriba que se puede medir añadiendo pesas al platillo P.

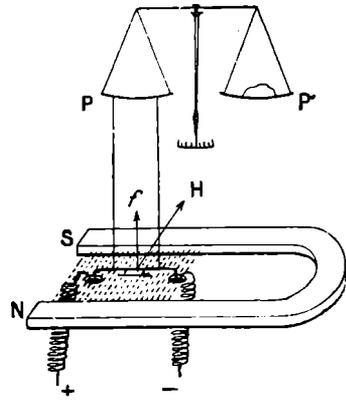


Fig. 794.

Este resultado se halla comprendido en el enunciado anterior. Pero, si hacemos girar el imán NS en el plano horizontal, observaremos que, a medida que el campo se va volviendo oblicuo a la corriente, la fuerza f disminuye y se anula cuando el campo está en la misma dirección que la corriente.

Este resultado se halla comprendido en el enunciado anterior.

Pero, si hacemos girar el imán NS en el plano horizontal, observaremos que, a medida que el campo se va volviendo oblicuo a la corriente, la fuerza f disminuye y se anula cuando el campo está en la misma dirección que la corriente.

Intensidad de la fuerza a que se halla sometido un elemento de corriente en un campo magnético. — Fórmula de Laplace. — Todos los experimentos cuantitativos relacionados con la acción de un campo magnético sobre una corriente establecen la ley elemental siguiente, debida a Laplace :

Cuando un elemento de corriente AB (fig. 795), de intensidad electromagnética i y de longitud λ , se coloca en un campo magnético de intensidad H cuya dirección forma un ángulo ω con la dirección de la corriente, está sometido a una fuerza cuya intensidad es.

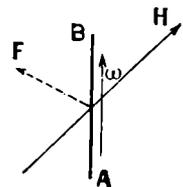


Fig. 795.

$$F = Hi\lambda \text{ sen. } \omega.$$

Ya hemos definido la dirección de esta fuerza.

Sea I la intensidad de la corriente en amperios. Tenemos $i = \frac{I}{10}$ y, por consiguiente,

$$F = \frac{HI\lambda \text{ sen. } \omega}{10}.$$

OBSERVACIONES. — 1º En caso de que el elemento de corriente sea perpendicular a la

dirección del campo, tendremos $\omega = \frac{\pi}{2}$, $\text{sen } \omega = 1$ y, por consiguiente, $F = H i \lambda = \frac{H I \lambda}{10}$, que es el valor máximo de la fuerza.

2º. Si el elemento de corriente es paralelo a la dirección del campo $\omega = 0$, $\text{sen } \omega = 0$ y, en consecuencia, $F = 0$.

3º. *Experimentos de Carvallo*. — La ley de Laplace ha sido sometida a un estudio experimental directo por Carvallo *, mediante un aparato del cual es una simplificación el que acabamos de describir. De esto modo, ha reconocido directamente la exactitud de la ley de Laplace, que antes sólo podía comprobarse por sus consecuencias.

797. Movimientos de rotación continuos creados por las fuerzas electromagnéticas. — Motores eléctricos. — Las fuerzas que los campos magnéticos ejercen sobre las corrientes pueden producir la rotación continua de los conductores.

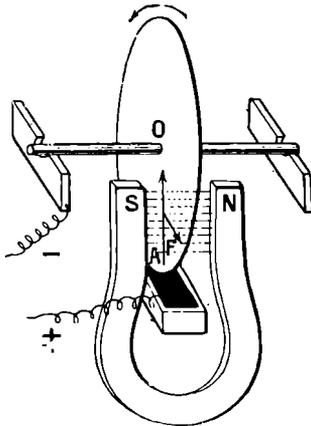


Fig. 796.

Rueda de Barlow. — En este caso se halla un pequeño aparato conocido con el nombre de *rueda de Barlow* (fig. 796). Consiste en un disco metálico que gira alrededor de un eje cuyos pequeños ejes están en comunicación con los polos de una pila; la circunferencia se sumerge en una pequeña cubeta que contiene mercurio en comunicación con el otro polo de la pila. Así, el disco está atravesado, según uno de sus radios, por una corriente que, en el caso de la figura, va de abajo a arriba. Se coloca un imán de herradura de modo que abrace a la rueda.

La fuerza electromagnética ejercida en la parte de rueda recorrida por la corriente está en el mismo plano que el disco y lo arrastra en el sentido de la flecha. Y como, en virtud de la construcción del aparato, un rayo sucede inmediatamente a otro, el movimiento de rotación es continuo.

El aparato constituye un pequeño *motor eléctrico*. En efecto, las fuerzas electromagnéticas, al mover la rueda en su propia dirección desarrollan un trabajo motor que se podría aprovechar, de no ser tan débil. Los motores eléctricos (854), tan empleados en la industria, están fundados en un principio análogo; pero se hallan colocados de tal modo que las fuerzas electromagnéticas, y por consiguiente sus trabajos, sean considerables.

798. Acción del campo magnético terrestre sobre una corriente. — Hagamos a un circuito plano ABCD (fig. 797) móvil alrededor de un eje vertical. Uno de los medios más sencillos para conseguirlo, consiste en terminar el circuito, en uno de sus extremos, por una punta *a* que penetra en un vasito de hierro *g* que contiene mercurio. El otro extremo *t* se sumerge en un recipiente anular que contiene también mercurio y está practicado en un bloque aislador, de parafina, por

* Véase: *la Science au xx^e siècle*, febrero de 1904.

corriente plana de forma cualquiera. Si i representa la intensidad de la corriente, en unidades electromagnéticas, la expresión del par será H/S .

La acción de la tierra sobre la corriente es idéntica a la que ejercería sobre un imán normal al plano de la corriente y de momento magnético $M_b = \frac{Si}{10} = Si'$.

800. Acción del campo terrestre sobre los solenoides. — Un carrete de espiras apretadas (es decir, un solenoide) puede considerarse como formado por una serie de corrientes planas todas paralelas y recorridas

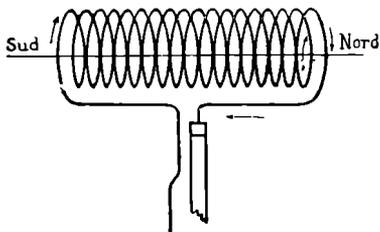


Fig. 798.

por corrientes del mismo sentido. Por lo tanto, si hacemos a un solenoide, móvil alrededor de un eje vertical (fig. 798), se le verá orientarse de manera que todas las espiras estén en planos perpendiculares al meridiano magnético; el eje del solenoide debe pues colocarse en el meridiano magnético, que es lo que sucede, en efecto.

Además, el polo que hemos llamado polo norte del solenoide (794) es precisamente el que se vuelve hacia el norte en la posición de equilibrio. Luego un solenoide se conduce lo mismo que un imán.

801. Acción de un imán sobre un solenoide. — Ya hemos visto que un solenoide obra sobre un imán móvil, como obraría otro imán. Recíprocamente, si se vuelve móvil un solenoide y se le acerca un imán, obsérvase que el polo norte del imán rechaza al polo norte del solenoide y atrae al polo sur. Luego un imán actúa sobre un solenoide como sobre otro imán.

ACCIONES DE LAS CORRIENTES SOBRE LAS CORRIENTES. — ELECTRODINÁMICA

802. Fuerzas a que está sometida una corriente en el campo magnético de otra corriente. — Las fuerzas a que está sometida una corriente en un campo magnético son independientes del origen de ese campo. Cuando una corriente se halla colocada en el campo magnético de otra corriente, está sometida a las fuerzas que siguen la ley de Laplace.

Las acciones de las corrientes sobre las corrientes fueron descubiertas por Ampère. Su estudio constituye la *electrodinámica*.

Entre los numerosos casos estudiados por Ampère, los más importantes son los siguientes.

803. Atracciones y repulsiones mutuas de las corrientes paralelas. — 1° *Dos corrientes paralelas y de mismo sentido se atraen.* Esta ley se establece fácilmente por un experimento, acercando a la porción AB (fig. 797) de una corriente rectangular móvil, un alambre recorrido por una corriente y colocado paralelamente.

Demostración. — Sea una corriente rectilínea XY (fig. 799). Esta crea en M un campo magnético H perpendicular al plano de la figura y dirigido de delante hacia atrás. Si en M, colocamos una segunda corriente X'Y' paralela a XY y del mismo sentido que ella, estará en el campo H,

sometida a una fuerza F' que parece ser una atracción ejercida por XY . Del mismo modo, $X'Y'$ crea un campo magnético H' , en el cual la corriente XY está sometida a la fuerza F , dirigida como si $X'Y'$ ejerciera atracción sobre XY .

2º Exactamente del mismo modo, se vería que : *Dos corrientes paralelas y de sentido contrario se repelen*, lo cual puede comprobarse fácilmente por experimentación.

804. **Acciones mutuas de los solenoides.** — Acercando a un solenoide móvil, los polos de otro solenoide sujeto en la mano, se observa que los polos de mismo nombre de dos solenoides se repelen y que los polos de nombre contrario se atraen.

Luego dos solenoides obran uno sobre otro como dos imanes.

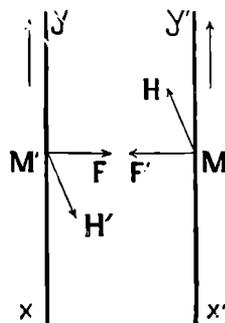


Fig. 799.

FLUJO MAGNÉTICO. — TRABAJO ELECTROMAGNÉTICO

805. **Flujo magnético.** — 1º *Definición del flujo.* — Consideremos en un campo magnético, uniforme o no uniforme, una superficie pequeña, de área s , colocada en un punto M (fig. 800), en que el campo está representado en magnitud y dirección por MH . Se llama *flujo de fuerza magnética* o simplemente *flujo magnético* a través de la superficie s , al producto $\varphi = Hs \cos. \alpha$, siendo α el ángulo de la dirección del campo con la normal a la superficie. Si se trata de una superficie de magnitud limitada, se supone la superficie descompuesta en elementos bastante pequeños, para ser considerados como planos y para que el campo sea uniforme en la extensión de cada uno de ellos. Entonces el flujo de fuerza a través de la superficie es igual a la suma de los flujos a través de sus diversos elementos.

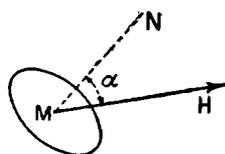


Fig. 800.

Si el elemento de superficie es normal a la dirección del campo, el flujo magnético a través de este elemento es igual al producto de la intensidad del campo por el área del elemento de superficie.

Si el elemento de superficie es paralelo a la dirección del campo, es nulo el flujo a través de este elemento.

2º *Representación del flujo.* — Consideremos un campo magnético uniforme, por ejemplo, el interior de un carrete recorrido por una corriente (fig. 801);

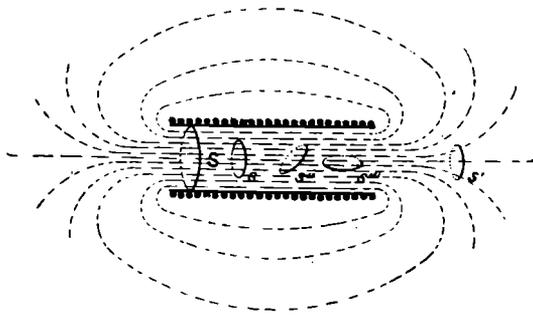


Fig. 801.

en el que supondremos líneas de fuerza igualmente separadas.

Consideremos, en este campo, elementos de superficie S y s , normales al campo; es evidente que el flujo de fuerza a través de S y s , que están

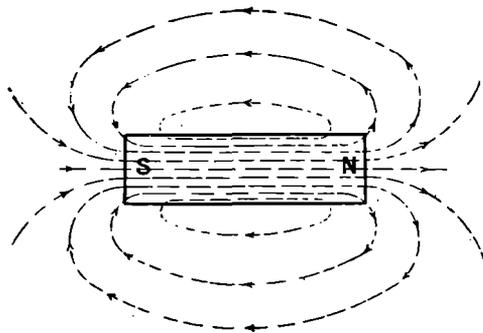


Fig. 802.

entre sí como la misma superficie, son proporcionales al número de líneas de fuerza que penetran a través de estas superficies. De un modo general, sea cual fuere la posición de una superficie, bien al interior, bien al exterior del carrete, podemos medir el flujo magnético a través de esta superficie por el número de líneas de fuerza que la atraviesan*. Así es como disminuye el flujo a través de una superficie cuando ésta se aleja hacia las regiones en que las líneas de fuerza se separan y donde el campo es menos intenso (superficie s'), y cuando esta superficie se inclina sobre la dirección de las líneas de fuerza (superficie s''); si la superficie considerada es paralela a las líneas de fuerza, el flujo será nulo (superficie s''').

806. Caso de un imán. — Flujo de inducción. — Inducción magnética. — En el caso de un imán NS (fig. 802), el campo magnético exterior es muy análogo al de un solenoide; pero no se puede observar las líneas de fuerza en el interior de un imán, como se efectúa en el interior de un solenoide.

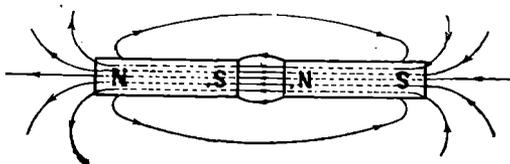


Fig. 803.

Sin embargo, es natural suponer las prolongadas en lo interior del imán de manera que las líneas de fuerza estén cerradas sobre sí mismas como las de un solenoide. Este modo de ver está confirmado por el experimento siguiente. Si se corta una barra imantada NS (fig. 803) por una sección perpendicular a su eje, los dos extremos $N'S'$ del corte son dos nuevos polos (831). Si se forma el fantasma magnético de la barra cuyos dos extremos están colocados a poca distancia, se ven líneas de fuerza entre N' y S' . Estas líneas de fuerza se hacen cada vez más paralelas y se acercan cada vez más en el intervalo $N'S'$; a medida que se acercan las dos mitades de la barra.

Líneas de inducción. — Las prolongaciones de las líneas de fuerza en lo interior del imán se llaman *líneas de inducción*.

Flujo de inducción. — Se puede considerar que la sección de un imán está atravesada por un flujo magnético particular. Este flujo se denomina el *flujo de inducción* que recorre la sección de la barra. Los fenómenos de inducción (842) permiten medir cómodamente el flujo, y del mismo modo que el que recorre la sección de un solenoide.

Inducción magnética. — Llámase *inducción magnética* de una barra imantada al coeficiente \mathcal{B} que resulta de dividir el flujo de inducción Φ que recorre la sección de la barra, por el área s de esta sección.

Tenemos, pues, $\mathcal{B} = \frac{\Phi}{s}$; de donde $\Phi = \mathcal{B}s$.

* Es evidente que el número de líneas de fuerza que atraviesan una superficie es infinito: aquí, se trata de líneas de fuerza que, en la región interior del carrete, donde el campo es uniforme, están separadas regularmente.

Del mismo modo que para un solenoide cuyo campo interior sea H , para el flujo magnético φ tenemos la igualdad

$$\varphi = Hs.$$

La inducción magnética se mide en gaus, como un campo magnético.

El valor de la inducción de un imán puede medir la *intensidad de su imantación*.

807. Trabajo electromagnético. — Cuando se mueve en un campo magnético un circuito recorrido por una corriente, o bien, cuando se mueve un imán en el campo magnético de una corriente, las fuerzas electromagnéticas ejecutan un trabajo, que es motor o resistente, según el sentido del movimiento.

Caso de un elemento de circuito. — Las fuerzas electromagnéticas cumplen un trabajo, cuando el elemento de circuito, al moverse, corta las líneas de fuerza del campo.

En efecto, en el caso contrario, o el elemento de corriente está en la dirección del campo, y la fuerza electromagnética es nula, o bien el movimiento es perpendicular a la fuerza electromagnética y, por consiguiente, es nulo el trabajo de esta fuerza.

Caso de un circuito cerrado. — Cuando un circuito se halla en un campo magnético, en libertad de obedecer a las fuerzas electromagnéticas, se coloca como hemos visto (798), perpendicularmente al campo y de tal manera que las líneas de fuerza de este campo entran por su cara sur. En este caso, el flujo que penetra por esta cara sur es máximo. De modo general, se demuestra que el trabajo de las fuerzas electromagnéticas es *positivo*, cuando el flujo que penetra por la cara sur del circuito aumenta, o bien, cuando disminuye el flujo que entra por la cara norte, y *negativo*, en el caso contrario.

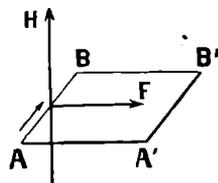


Fig. 804.

Expresión del trabajo electromagnético. — Supongamos que un elemento AB (fig. 804) de corriente, de intensidad electromagnética i y de longitud λ , se mueve en un campo magnético de intensidad H perpendicular a él, y en la dirección de la fuerza F a que está sometido. De este modo, describe un pequeño rectángulo $ABA'B'$. Sea a la longitud del movimiento AA' . El trabajo $\Delta\mathcal{C}$ de la fuerza F , durante este movimiento, es en ergos,

$$\Delta\mathcal{C} = F \times a = H\lambda a = H\lambda s.$$

Designando por s la superficie del rectángulo $ABA'B'$.

Se ve que

$$\Delta\mathcal{C} = i\Delta\varphi,$$

en que $\Delta\varphi$ representa el flujo que recorre al área $ABA'B'$. A $\Delta\varphi$ se denomina también *flujo cortado por el elemento de circuito durante su movimiento*.

Se puede demostrar que la misma fórmula se aplica al caso en que el campo magnético y el movimiento de AB tienen direcciones cualesquiera.

Caso del movimiento o de la deformación de un circuito en un campo magnético. — Si un circuito cerrado se mueve o se deforma, en un campo magnético, cada uno de sus elementos sufre un movimiento y corta cierto flujo magnético. Para evaluar el trabajo electromagnético tendremos que efectuar una suma de elementos tales como $i\Delta\varphi$. Pero los movimientos de determinadas porciones del circuito podrán dar lugar a trabajos elementales motores, y otros, a trabajos resistentes, de modo que varias de las cantidades $\Delta\varphi$ deben considerarse como positivas y las otras, como negativas.

De modo general, demuéstrase que el trabajo total de las fuerzas electromagnéticas es :

$$\mathcal{C} = i\Delta\Phi,$$

en que $\Delta\Phi$ representa la cantidad en que varía el flujo que atraviesa a todo el circuito entero. El trabajo es motor o resistente en los casos que ya hemos definido.

Como todas las magnitudes que intervienen en esta expresión del trabajo están evaluadas en unidades cegesimalas, el trabajo resulta evaluado en ergamias. En una corriente I , valuada en amperios, el trabajo, *valuado en julios*, es

$$\mathcal{C} = \frac{1}{10^7} I \Delta\Phi.$$

CAPÍTULO VIII

MEDIDA DE LA INTENSIDAD DE LAS CORRIENTES GALVANÓMETROS. — AMPERÍMETROS Y VOLTÍMETROS

808. Definiciones. — Galvanómetros de imán móvil. — Los galvanómetros son aparatos destinados a medir la intensidad de las corrientes. Los llamados *absolutos* tienen tal forma, que permite calcular directamente dicha intensidad. Pero los galvanómetros ordinarios son aparatos *relativos* con los cuales se compara la intensidad de dos corrientes o, sencillamente, se observa la existencia de una corriente.

Los galvanómetros de *imán móvil* están fundados en la acción de una corriente cerrada (circular o no circular) sobre un imán. Si la corriente se halla en el meridiano magnético (fig. 786), tiende a colocar el imán perpendicularmente a este plano; mientras que la acción de la Tierra tiende, al contrario, a llevarlo a este plano. Si tratamos, pues, de que el galvanómetro sea sensible a una corriente muy poco intensa, será necesario aumentar la acción de la corriente y disminuir la acción contraria del campo magnético terrestre.

Para aumentar la acción de la corriente, se enrolla muchas veces el alambre conductor alrededor de la aguja magnética. Para disminuir la

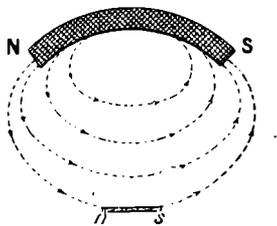


Fig. 805.

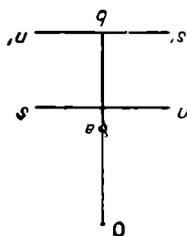


Fig. 806.

acción de la Tierra, se conocen dos medios. Uno consiste en colocar sobre la aguja magnética ns (fig. 805), un imán permanente NS , dispuesto de tal modo que su campo (del cual se han representado varias líneas de fuerza con su sentido) esté en sentido contrario del campo terrestre.

Haciendo variar su distancia puede anularse o simplemente aminorarse la acción de la Tierra. De este modo, se varía a voluntad la sensibilidad del aparato.

El segundo medio consiste en emplear un sistema llamado *astático*, de dos agujas magnéticas. Es un conjunto de dos agujas, $ns, n's'$ (fig. 806),

imantadas todo lo igualmente que se pueda y fijas a un mismo vástago *ab*, colocadas paralelamente, con los polos en sentido inverso. Como el campo magnético terrestre ejerce acciones de sentidos contrarios en cada aguja, estas dos acciones se anulan cuando ambas agujas tengan rigurosamente la misma imantación; si el sistema se suspende de un hilo de seda dejará de dirigirse bajo la acción de la Tierra, a lo cual se debe su nombre. En realidad, es imposible realizar sistemas perfectamente astáticos.

809. **Galvanómetro Thomson.** — En este aparato (fig. 807) inventado por lord Kelvin (sir W. Thomson) y uno de los más sensibles que existen, se ha recurrido a cuantos medios pueden aumentar su sensibilidad.

En efecto, se compone de un sistema astático de dos imanes pequeños (que tienen próximamente 1 cm. de largo) suspendido de un hilo de seda.

Alrededor de cada imán hay un carrete que contiene la corriente por estudiar. Sus efectos se añaden a los dos imanes gracias al enrollamiento (fig. 808) que hace

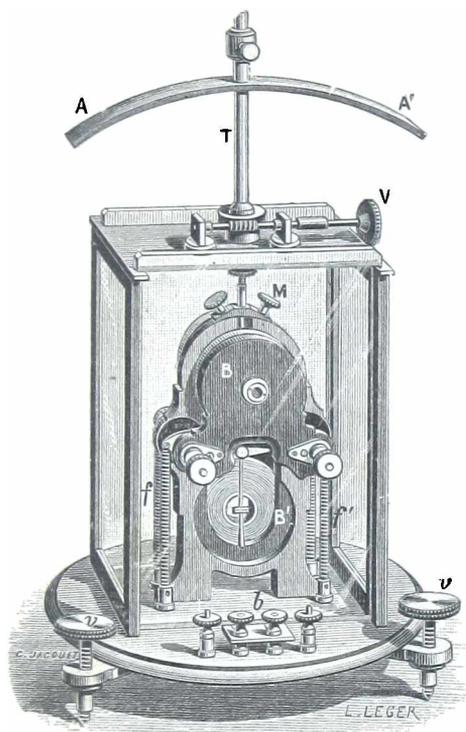


Fig. 807.

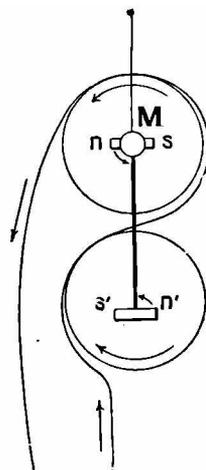


Fig. 808.

circular la corriente en sentido inverso en los dos carretes. Se puede aumentar o disminuir* la sensibilidad del aparato, por medio de un imán de compensación *AA'* que se coloca a la altura y orientación que se quiera. La desviación del sistema astático se evalúa por el método de reflexión: *M* (fig. 808) es un espejito aplicado a una de las agujas, y en él se hace reflejar un haz de rayos luminosos, que forma una imagen en una escala graduada (480).

* En efecto, hay casos en que, al estudiar corrientes cuya intensidad no es muy pequeña, el exceso de sensibilidad es un inconveniente.

Fácilmente se pueden obtener desviaciones de 1 o 2 centímetros en una escala colocada a 1 metro del galvanómetro para una corriente de una millonésima de amperio. La resistencia de los carretes de un Thomson es, generalmente, de unos 10 000 ohmios.

810. Galvanómetro diferencial. — En realidad, los dos carretes del galvanómetro Thomson son independientes. Pueden montarse en serie, como hemos visto, de manera que sean atravesados por la misma corriente.

También pueden ser recorridos por corrientes distintas. Si éstas circulan en el mismo sentido por los carretes, tienden a producir desviaciones contrarias. Si los dos carretes y los dos imanes fuesen idénticos, la desviación sería nula, cuando fueran iguales las intensidades de ambas corrientes, lo cual no sucede nunca; pero se puede determinar la relación de las intensidades de dos corrientes que anulen la desviación. El aparato sirve también para comparar directamente las intensidades de dos corrientes. El galvanómetro dispuesto en esta forma, se denomina *galvanómetro diferencial*.

811. Galvanómetro balístico. — En ciertos experimentos, la corriente que atraviesa un circuito no dura sino muy poco tiempo. Si se coloca un galvanómetro en este circuito, la aguja experimenta una especie de choque que la hace desviar cierto ángulo, volviendo, luego, tras una serie de oscilaciones, a su posición de equilibrio. Se ha demostrado que si el galvanómetro no se calma, este ángulo es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa; luego el galvanómetro puede servir también para calcular esta cantidad.

El galvanómetro dispuesto así, para calcular la cantidad de electricidad que pasa durante un tiempo muy corto, se llama *galvanómetro balístico*. Puede graduarse en culombios (839).

812. Shunt de los galvanómetros. — Para poder medir corrientes cuya intensidad no sea muy pequeña, por medio de un aparato sensible y delicado, se acompaña un *shunt* (782) a los galvanómetros.

El shunt consiste en una caja de resistencias que se intercala *en derivación* entre los bornes del galvanómetro y que posee tres carretes que tienen respectivamente una resistencia $1/9$, $1/99$ $1/999$ de la resistencia del galvanómetro. Intercalándolos sucesivamente sólo se hace pasar por el galvanómetro $1/10$, $1/100$ o $1/1000$ de la corriente principal.

El aparato se dispone de manera que se pueda suprimir también toda derivación y, de este modo, hacer pasar por el galvanómetro la totalidad de la corriente principal; de este modo, se dispone de toda la sensibilidad del aparato.

813. Contraste de un galvanómetro. — Antes de emplear un galvanómetro, es preciso *contrastarlo*, es decir, determinar la intensidad de corriente a que corresponde una desviación indicada en la escala.

Para esto, se colocan en serie, en el circuito, un acumulador, el galvanómetro por contrastar y un galvanómetro absoluto o, en su defecto, un voltámetro de nitrato de plata.

Uno u otro de estos aparatos da la intensidad i_0 de la corriente en el circuito. Dada la sensibilidad de los galvanómetros, conviene, a menudo, añadir un shunt al aparato por contrastar. De este modo, pasará por él una corriente de intensidad i_0 , conocida en

amperios. Sea d_0 la desviación correspondiente. (Además, haciendo variar la intensidad de la corriente se verá que si la desviación es pequeña, es proporcional a la intensidad de aquélla.)

Por lo tanto, si, en otro experimento en que el galvanómetro esté recorrido por una corriente de intensidad i desconocida, se lee una desviación d , la intensidad i es tal que tendremos :

$$\frac{i}{i_0} = \frac{d}{d_0} \quad \text{o} \quad i = \frac{i_0}{d_0} \times d = Gd.$$

La cantidad $\frac{i_0}{d_0}$, que designamos por G , se denomina *constante del galvanómetro* : es la intensidad que corresponde a una desviación de una división. Para obtener la intensidad i correspondiente a la desviación d , basta efectuar el producto de G por d

814. Galvanómetros de corriente móvil. — La acción de un campo magnético sobre una corriente tiene importante aplicación en los galvanómetros de corriente móvil. Uno de los más conocidos, de entre estos aparatos, es el galvanómetro Deprez-d'Arsonval (fig. 809).

Galvanómetro Deprez-d'Arsonval. — Se compone de un circuito enrollado varias veces en un bastidor rectangular ligero y que comunica, por dos alambres de suspensión, con el circuito en que se quiere manifestar una corriente.

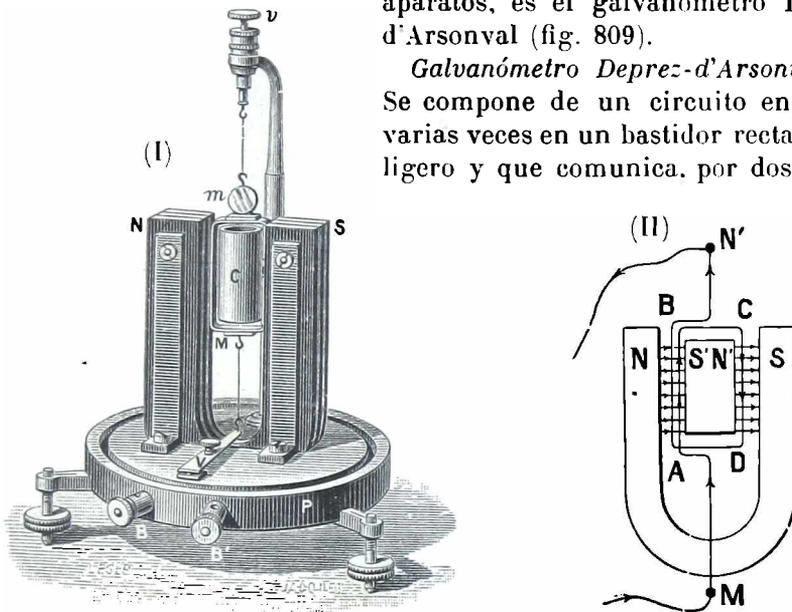


Fig. 809.

bres de suspensión, con el circuito en que se quiere manifestar una corriente. El bastidor se halla entre los dos polos NS de un poderoso imán de herradura (fig. 809, I y II) y, en su interior, hay un cilindro C de hierro dulce, que se imanta por influencia (822) y que aumenta mucho la intensidad del campo magnético en que están colocadas las porciones verticales del circuito. Es fácil ver que si circula una corriente por el bastidor, cada porción vertical estará sometida a una fuerza perpendicular a la vez a su dirección y a la línea de los polos NS. Estas dos fuerzas tienen sentido contrario y tienden a llevar a AB detrás del plano de la figura y a CD, delante. Forman un par que hace girar el bastidor hasta que su acción se equilibre por la torsión. Un espejo m , fijo en el bastidor, permite medir, por el método de reflexión, los movimientos angulares por pequeños que sean.

Cuando es débil la resistencia de todo el circuito, el aparato, a causa de varios fenómenos de inducción (836), posee la buena cualidad de ser *aperiódico*, esto es, que adopta, sin oscilaciones, su posición de equilibrio.

Además, dada la magnitud del campo magnético del imán, las indicaciones del aparato no son alteradas por la presencia de corrientes o de imanes instalados en sus inmediaciones. Por lo tanto, se presta a las medidas efectuadas en las fábricas.

Galvanómetro Lebedew. — La sensibilidad de un galvanómetro de corriente móvil puede aumentarse notablemente reemplazando el imán por un electroimán (823), que es lo que ocurre en el galvanómetro Lebedew.

815. **Galvanómetros absolutos.** — **Brújula de tangentes.** — El tipo de los galvanómetros absolutos de imán móvil es la *brújula de tangentes*, ideada por Pouillet.

Una brújula de tangentes puede constituirse suspendiendo del centro de un circuito circular, un imán pequeño *ns* (fig. 786), que contenga un espejito destinado a medir sus desviaciones. El circuito puede dar varias vueltas alrededor del imán, para aumentar la desviación de éste. Al principio, dicho circuito está instalado en el meridiano magnético, luego, se le dirige la corriente, y se mide la desviación α del imán. Sabemos que $\text{tg. } \alpha$ es igual a la relación entre el campo H' de la corriente y la componente horizontal H del campo terrestre (792). Luego

$$\text{tg. } \alpha = \frac{H'}{H}.$$

Pero si el circuito tiene n vueltas de radio R cm., el campo H' , en el centro, está ligado a la intensidad electromagnética i por la relación

$$H' = \frac{2n\pi i}{R} \quad (793).$$

Luego

$$\text{tg. } \alpha = \frac{2n\pi i}{RH}; \quad \text{de donde} \quad i = \frac{RH}{2n\pi} \text{tg. } \alpha.$$

Y la intensidad I será, en amperios :

$$I = \frac{10RH}{2n\pi} \text{tg. } \alpha.$$

Se ve que la medida de la desviación α permite calcular la intensidad de la corriente.

816. **Electrodinamómetros.** — El electrodinamómetro, aparato destinado a la medida de la intensidad de una corriente, se funda en la acción mutua de dos corrientes.

Para medidas absolutas, la brújula de tangentes requiere el conocimiento de la componente horizontal del campo terrestre, que nunca puede determinarse con gran precisión. Los electrodinamómetros absolutos no ofrecen este inconveniente. Su principio fué indicado por Lippmann y realizado por Pellat.

El aparato consiste en un largo carrete horizontal B (fig. 810) que posee n espiras por cada centímetro de longitud, y otro carrete b , que posee por junto N espiras de S cm² de superficie, colocado verticalmente en el interior del primero. Se halla fijo al extremo de un fiel de balanza, móvil alrededor de un cuchillo c y cuyo otro extremo lleva un platillo P , sujeto en el extremo de un brazo de palanca de longitud l .

Se disponen alambres de comunicación de modo que la corriente, de intensidad electromagnética desconocida i pase por los dos carretes. Supongamos que el primero sea de longitud ilimitada. Creará en su interior un campo $4\pi ni$ (795). El carrete menor equi-

vale a un imán de momento magnético NSi (799). Está, pues, sometido a un par cuyo momento es.

$$M = NSi \times 1\pi i = 4\pi NnSi^2.$$

El sentido de la corriente es tal que este par tiende a levantar el platillo. Para equi-

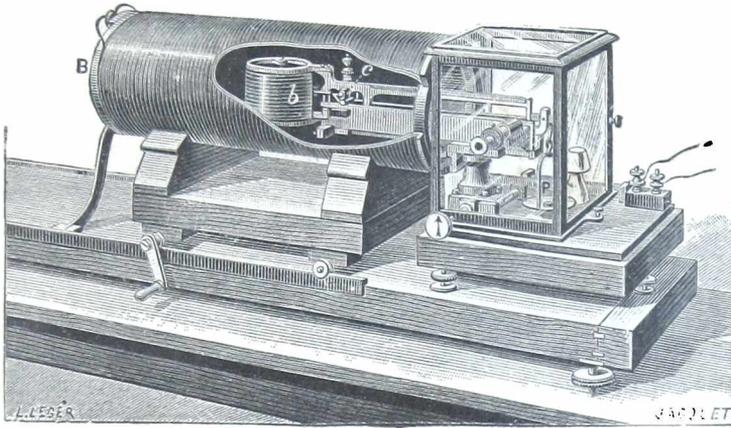


Fig. 810.

librarlo se coloca m gramos en dicho platillo. El equilibrio se restablecerá en cuanto el momento mgl del peso de m sea igual a M .

$$mgl = 4\pi NnSi^2, \quad \text{de donde} \quad i = \sqrt{\frac{mgl}{4\pi NnS}}.$$

Esta fórmula nos permite calcular el valor de i . En realidad, como el carrete fijo no es infinitamente largo, hay que efectuar una corrección en el resultado.

OBSERVACIONES. — 1ª Conociendo la intensidad i de una corriente, en unidades electromagnéticas, se deduce inmediatamente el valor $I = 10 i$ de esta intensidad expresada en amperios.

2ª Si se invierte, en un electrodinamómetro, el sentido de la corriente, como cambia en los dos carretes a la vez, no varía el sentido de la acción electrodinámica. Por eso un electrodinamómetro puede servir para medir la intensidad de una corriente alterna (859).

3ª Si a los dos carretes del electrodinamómetro, se envían dos corrientes i e i' de intensidades diferentes, la indicación del aparato es proporcional al producto ii' .

AMPERÍMETROS Y VOLTÍMETROS

817. Amperímetros. — Son aparatos industriales de medición para la intensidad de las corrientes. Hay numerosos tipos.

I. *Amperímetro de imán móvil (Deprez-Carpentier).* — Consta de una pequeña paleta de hierro ns (fig. 812) imantada y orientada por el campo magnético de dos imanes potentes NN (fig. 811).

Los dos extremos de la aguja penetran en dos carretes BB' , inclinados sobre la línea de los polos de los imanes y por los cuales se hace pasar la corriente que se trata de medir. Esta circula en tal sentido, que tiende a colocar la aguja magnética paralelamente a las espiras. Los imanes, al contrario, tienden a llevarla a la primera posición, por lo cual se produce una desviación que, cuando no excede de 40° , es casi proporcional a la intensidad de la corriente. El eje del imán móvil contiene una esfera exterior.

El instrumento gradúase en amperios por comparación, ya con un voltámetro de nitrato de plata (734), ya con un galvanómetro absoluto o cualquier otro aparato graduado.

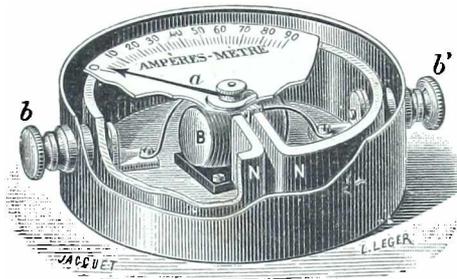


Fig. 811.

Como los imanes se debilitan progresivamente, conviene comprobar de vez en cuando la graduación.

II. *Amperímetro de corriente móvil (Chauvin y Arnoux)*. — Los amperímetros de corriente móvil están fundados en un principio idéntico al del galvanómetro Deprez-d'Arsonval. Es el amperímetro de Chauvin y Arnoux.

Consta de un imán circular NS (fig. 813), entre los polos del cual hay una bola de hierro rodeada por un carrete que comunica con los bornes del aparato, en derivación de los cuales hay un shunt; de modo que por el carrete pasa una fracción de la corriente que se mide. Este carrete se desvía por la influencia de la acción electromagnética. Contiene una aguja móvil ante una esfera. Dos resortes espirales equilibran la acción electromagnética; la desviación es tanto mayor cuanto más grande es la intensidad de la corriente. El aparato se gradúa como el anterior.

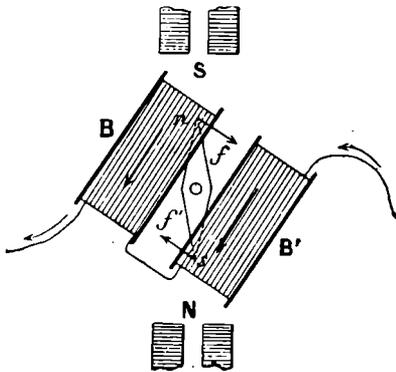


Fig. 812.

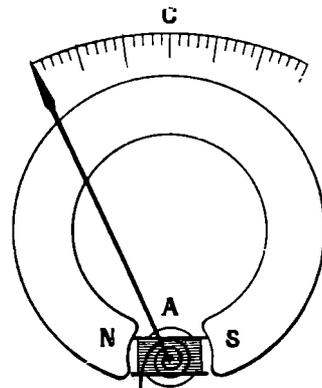


Fig. 813.

III. *Amperímetros térmicos (Cardew, Hartmann y Braun)*. — Son aparatos fundados en la elevación de temperatura que sufre un alambre delgado (de una aleación de platino y plata) al ser recorrido por una corriente. Como las corrientes por medir son demasiado intensas para este alambre, se lo coloca en derivación entre los extremos de un shunt de poca resistencia, de modo que no pase sino una pequeña fracción de la corriente total. A consecuencia de la elevación de su temperatura, el alambre se alarga más o menos, según la intensidad de la corriente. Este alargamiento, ampliado por un pequeño mecanismo, transmítese a una aguja que se mueve en un cuadrante. El aparato se gradúa en amperios por comparación con otro amperímetro.

Los amperímetros térmicos ofrecen la ventaja de que sirven lo mismo para corrientes alternas (859) que para corrientes continuas, lo que no sucede con los precedentes. El primer amperímetro térmico fué construido por Cardew; el más usado es el de Hartmann y Braun.

En este instrumento, el alambre de aleación de platino y plata se encuentra en AB (fig. 814) en derivación sobre un shunt que no está representado. Un alambre delgado CD, de latón, atado a AB en C, está fijo en D. Un hilo de seda EF está atado en E al alambre de latón y en F a un resorte que le tiene tirante, y pasa por una polea P que sostiene la aguja indicadora *a* móvil en un cuadrante graduado. Cuando pasa la corriente, el alambre AB se alarga; los hilos EF y DC siguen tirantes gracias al resorte R; el punto E se mueve hacia la izquierda, la polea da vuelta y la aguja se mueve hacia la derecha.

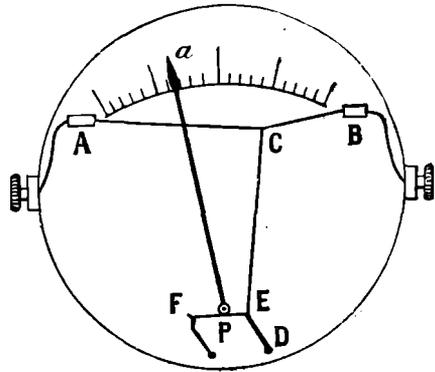


Fig. 814.

IV. *Resistencia de los amperímetros.* — Sea cual fuere su modo de construcción, un amperímetro tiene siempre muy poca resistencia eléctrica, que hasta puede considerarse como despreciable. Por lo tanto, cuando se le intercala en un circuito, solo se produce en éste un consumo insignificante de energía en forma de calor.

818. *Voltímetros.* — Los voltímetros o *voltiómetros* se construyen bajo los mismos tipos que los amperímetros; pero ofrecen resistencia muy grande. El voltímetro de imán móvil de Deprez-Carpentier sólo difiere del amperímetro correspondiente en que sus carretes se componen de muchísimas espiras de alambre muy delgado. En un voltímetro de bastidor móvil y en un voltímetro térmico se suprime el shunt sustituyéndolo por un carrete muy resistente, colocado en serie.

Aplicaciones. — Los voltímetros sirven para medir las *diferencias de potenciales* y las *fuerzas electromotrices*.

1º *Caso de una diferencia de potenciales.* — Supongamos los dos puntos A y B (fig. 815) adonde llegan, para un abonado, los alambres de una instalación eléctrica. Colócase el voltímetro E en derivación, entre A y B. A causa de su grandísima resistencia, no pasa por él sino una corriente muy débil, con un consumo de energía despreciable. La intensidad de esta corriente es proporcional a la diferencia de potenciales que existe entre A y B (773).

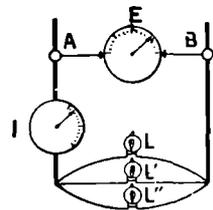


Fig. 815.

Para efectuar la graduación, se pone el voltímetro en derivación entre dos puntos de un alambre separados por una resistencia conocida *r* ohmios. Se hace pasar por ese alambre una corriente cuya inten-

sidad i amperios se mide con un amperímetro. De este modo, establécese entre los bornes del voltímetro una diferencia de potenciales conocida ri voltios, que se inscribe en la esfera, en el punto en que se detiene la aguja. Por medio de un reóstato, se varía la intensidad de la corriente, y, para cada intensidad, se marca, en la esfera del voltímetro, el valor del producto ri .

2º *Caso de una fuerza electromotriz.* — Unamos los bornes de un voltímetro a los polos de una pila o de un generador de corriente cualquiera. Como la resistencia del voltímetro es muy grande con respecto a la del generador, sabemos que entre los polos de éste se establece una diferencia de potenciales igual a su fuerza electromotriz (775). El voltímetro mide esta diferencia de potenciales y, por consiguiente, la fuerza electromotriz del generador.

819. **Medida de la potencia y de la energía consumidas en una instalación eléctrica.** — En primer lugar, entre los extremos A y B (fig. 815) de los cables eléctricos, intercálase un voltímetro E que mide la diferencia de potencial. Un amperímetro I, instalado en el circuito principal, mide la intensidad de la corriente utilizada. Multiplicando el número de amperios (por ejemplo : 40 amperios para 50 lámparas ordinarias) por el de voltios (por ejemplo; 110 voltios, voltaje ordinario en las distribuciones de las ciudades) se tendrá (4 400 vatios) la potencia absorbida en la instalación (774).

Multiplicando luego el número de centenas de vatios (44 hectovatios) por el número de horas que ha circulado la corriente, se tendrá, en *hectovatios-horas*, la energía consumida.

Más cómodamente, se emplean contadores espediales, llamados *contadores de energía*, que indican directamente el número de *hectovatios-horas* suministrados de este modo.

820. **Vatiómetros.** — Los vatiómetros son *aparatos* destinados a medir en vatios la *potencia* consumida en una instalación eléctrica.

Constan de dos carretes. Uno de alambre grueso, dispuesto como un amperímetro, es decir, que es recorrido por la corriente i consumida. El otro, de alambre largo y delgado, se halla colocado como un voltímetro, es decir, puesto en derivación entre los puntos A y B (fig. 815) de llegada de los cables a la instalación; por lo tanto, circula en él una corriente i' , cuya intensidad es proporcional a la diferencia de potenciales V que existe entre A y B. Estos dos carretes forman un electrodinamómetro. La acción mutua de ambos carretes es proporcional a ii' , esto es, a Vi y, por consiguiente, a la potencia consumida por la instalación. Esta acción se equilibra por un resorte o por un contrapeso. Uno de los carretes se desvía y su desviación está indicada por el movimiento de una aguja en un cuadrante graduado en vatios.

Para efectuar esta graduación, se coloca en serie, con el carrete de alambre grueso, un amperímetro que mide la intensidad i , y, en derivación, entre A y B, instálase, al mismo tiempo que el carrete de alambre delgado, un voltímetro que da la diferencia de potenciales V . Se dan diferentes valores, a i , modificando la resistencia del circuito mediante un reóstato, y se inscriben los distintos valores del producto Vi en el cuadrante del vatiómetro.

821. **Aparatos registradores.** — Los aparatos que acabamos de estudiar, amperímetros, vatiómetros y vatiómetros, pueden transformarse en aparatos registradores. Basta transmitir los movimientos del órgano

móvil a una palanca provista de una pluma que se mueva sobre un tambor giratorio.

Estos aparatos ofrecen, en particular, la ventaja de permitir la fácil observación de la marcha de las máquinas en las estaciones generadoras de corriente eléctrica. No sólo registran el trabajo del personal, sino que también avisan el momento en que la tensión o la intensidad de la corriente comprometen la seguridad de la instalación.

CAPÍTULO IX

IMANTACIÓN

822. **Imantación del hierro dulce.** — Colocada una barra de hierro dulce en un campo magnético, se *imanta*, y la dirección de su imantación (*recta que une su polo sur a su polo norte*) se halla en la dirección del campo magnetizador.

Se observa, en efecto, que una barrita de hierro dulce, colocada en distintas posiciones A, B, C (fig. 816) en las inmediaciones de un imán NS, adquiere una imantación indicada en la figura, conforme a la ley precedente.

Imantación en un carrete. — En el interior de un carrete recorrido por una corriente, existe un campo magnético uniforme que se puede hacer tan intenso como se quiera multiplicando el número de espiras

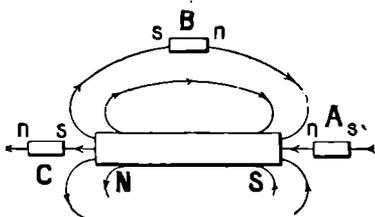


Fig. 816.

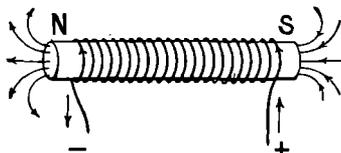


Fig. 817.

y aumentando la intensidad de la corriente. Si se coloca en él una barra de hierro dulce, ésta se imanta fuertemente; obsérvase que hay un polo norte en el mismo lado que el polo norte del propio carrete (fig. 817) lo cual está de acuerdo con la ley enunciada.

Si se llega a suprimir el campo magnetizador, el hierro conserva gran imantación; pero ésta desaparece fácilmente por la influencia de un campo pequeño, inverso del campo magnetizador (825). Es fácil ver que los polos N, S, formados en los extremos de la barra de hierro crean, en su interior, un campo magnético dirigido de N hacia S e inverso del campo magnetizador. De ahí resulta que al suprimir la corriente en el

solenoide, la barra de hierro se desimanta inmediatamente por la influencia del menor choque.

823. **Electroimanes.** — En la construcción de los *electroimanes*, se aprovecha dicha propiedad del hierro dulce. Muy frecuentemente, se fabrican estos aparatos en forma de herradura. Para esto, reúnen dos núcleos cilíndricos de hierro dulce por una pieza transversal, llamada *culata* (fig. 818) y se introducen en dos carretes en serie arrollados *en sentido contrario*. Cuando la corriente pasa, produce dos polos de nombre contrario, en los extremos de los núcleos. Contra los extremos se aplica una pieza de hierro dulce denominada *armadura*.

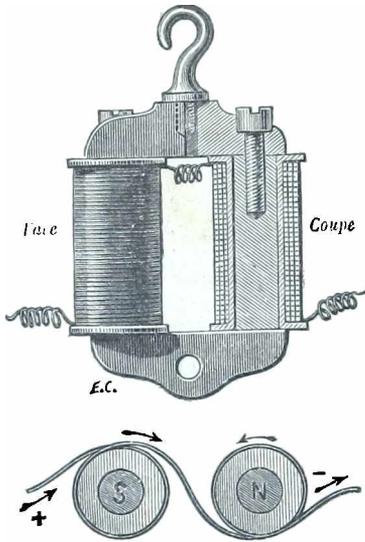


Fig. 818.

Mientras la armadura permanezca en contacto con los polos, la interrupción de la corriente no suprime el magnetismo. Esto se debe a que en la armadura, se desarrollan polos inversos a los del electroimán y la acción de estos últimos queda anulada. De este modo, la armadura queda aplicada contra los polos. Este es un inconveniente que cesa impidiendo el contacto ya por unos toques a propósito, ya interponiendo una

hoja de papel o cartón. De todas maneras, la imantación nunca desaparece por completo después de cesar la corriente : este fenómeno se expresa diciendo que el hierro del imán posee *magnetismo remanente*.

Fuerza portativa. — Llámanse fuerza portativa de un electroimán la fuerza con que hay que tirar de la armadura para separar los polos del imán. Por ejemplo, un electroimán cuyos núcleos tengan solamente 10 centímetros cuadrados de sección y estén rodeados por carretes que comprendan por junto 75 espiras, en que circule una corriente de 18 amperios, tiene una fuerza portativa de 100 kilogramos *

Producción de campos magnéticos intensos. — Los electroimanes pueden tener campos magnéticos muy intensos, que lleguen hasta 50 000 gaus.

Para obtenerlos se encorva el núcleo de hierro, de manera que las piezas polares estén frente a frente, y se les da formas variadas, según la intensidad y la extensión del campo magnético que se quiera obtener. Así las piezas polares planas dan un campo relativamente poco intenso,

* Se puede demostrar que la fuerza portativa, por unidad de superficie, se expresa en dinas por la fórmula $\frac{\mathcal{B}^2}{8\pi}$, en la que \mathcal{B} representa la inducción magnética desarrollada en el núcleo del electroimán. Si la superficie total de las secciones de las dos piezas polares es s , la fuerza portativa total será $\frac{\mathcal{B}^2 s}{8\pi}$.

pero uniforme, en una región bastante extensa. Por el contrario, las piezas cónicas producen un campo intenso, pero no uniforme.

824. **Imantación del hierro en un campo creciente. — Saturación. —**

Si se hace crecer la intensidad del campo magnetizador a que se halla sometida una barra de hierro, la imantación, que al principio crece muy rápidamente, aumenta luego de modo insensible cuando el campo magnetizador crece indefinidamente. Dícese que, entonces, el hierro está *imantado en saturación*.

La figura 819 representa la variación de la *inducción magnética* de una barra de hierro dulce, en función del valor del campo magnetizador.

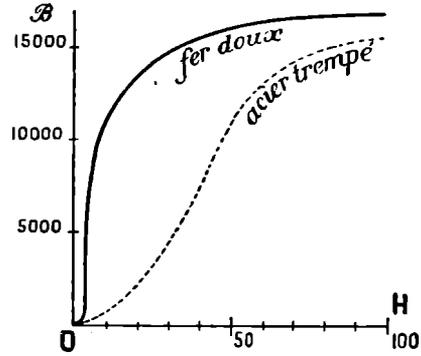


Fig. 819.

Para estudiar este fenómeno, se coloca la barra de hierro en el interior de un carrito recorrido por una corriente, cuya intensidad se hace crecer. Se procura que sea lo más pequeño posible el campo inverso debido a los polos desarrollados en la barra, dando a ésta gran longitud.

De este modo, el campo magnetizador es.

$$H = \frac{\pi n I}{10},$$

siendo I la intensidad de la corriente en amperios y n el número de espiras del carrito por unidad de longitud (795).

Se determina, para valores crecientes del campo magnetizador, el valor de inducción (806) desarrollado en el hierro. Para esto, se mide, por un método que expondremos más adelante (842) el flujo de inducción $\Phi = \mathcal{B}S$ a través del hierro. El cociente

$$\mathcal{B} = \frac{\Phi}{S}$$

nos da la inducción.

De esta manera, se puede medir, como se efectúa en el *permeámetro* de Thompson, la fuerza portativa de la barra de sección S y calcular \mathcal{B} según la fórmula $F = \frac{\mathcal{B}^2 S}{8\pi}$.

825. **Imantación en un campo variable. — Histéresis. —**

Cuando se somete una barra de hierro a la influencia de un campo, que oscila entre dos valores diferentes, la imantación no recibe el mismo valor para una misma intensidad del campo magnetizador, cuando éste crece o decrece. Es menor en el primer caso. Hay, pues, una especie de *retraso* de la imantación en el campo magnetizador. Ewing dió a este retraso el nombre de *histéresis*.

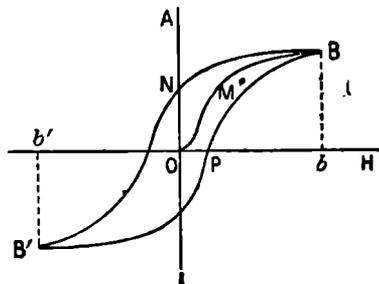


Fig. 820.

Supongamos, por ejemplo, que el campo oscila entre dos valores de signos contrarios; pero iguales en valor absoluto, representados por las abscisas Ob, Ob' , (fig. 820). Se observa que la inducción magnética,

que oscila a su vez entre los valores b' B' y bB , toma constantemente, durante el periodo creciente del campo, valores más pequeños (curva $B'PB$) que durante el periodo decreciente (curva RNB').

La histéresis corresponde a una pérdida de energía. En efecto, una barra, sometida a fuerzas magnetizadoras periódicas, se calienta sensiblemente.

Si el campo, después de adquirir el valor Ob , disminuye hasta cero, el hierro conserva todavía notable imantación; pero la pierde cuando se establece un campo inverso débil. Este campo inverso mide lo que se llama *fuerza coercitiva* del hierro.

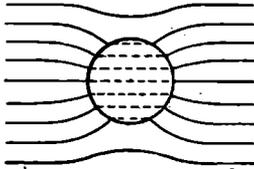


Fig. 821.

826. Permeabilidad magnética. — Circuito magnético. — Coloquemos un trozo de hierro dulce en el campo magnético de un imán o de un carrete y formemos el fantasma magnético de este campo: veremos que las líneas de fuerza se tuercen (fig. 821) y encuentran en

gran número al trozo de hierro, como si pasaran más fácilmente a través del medio ambiente. Este hecho experimental se expresa diciendo que el hierro tiene mayor *permeabilidad magnética* que el aire.

Se ve que la presencia del hierro aumenta el flujo que atraviesa toda superficie colocada a su alrededor.

Coefficiente de permeabilidad magnética. — Supongamos que en un solenoide recorrido por una corriente, se introduce una barra de hierro dulce que llene completamente el solenoide. Al flujo $\zeta = HS$ que recorre la sección del carrete, se añade ahora el flujo de inducción $\Phi = BS$ del hierro, imantado por la corriente. La relación μ entre el nuevo flujo y el antiguo, es decir, el número por el cual se multiplica el flujo al introducir el hierro, denominase *coeficiente de permeabilidad magnética* del hierro.

Se tiene

$$\mu = \frac{\Phi + \zeta}{\zeta} = 1 + \frac{\Phi}{\zeta} = 1 + \frac{B}{H}$$

El coeficiente μ no es constante. Cuando el campo magnético H aumenta, creciendo primero B más pronto que H , μ aumenta y llega a 2500 en un campo de 2 gaus. Pero si H aumenta indefinidamente, B tiende hacia un límite, y al tender $\frac{B}{H}$ hacia sero, μ tiende hacia 1. Esto quiere decir que, en campos intensos, la presencia del hierro no aumenta sensiblemente el flujo, mientras que un campo de 2 gaus lo multiplica por 2500.

OBSERVACIÓN. — Según la definición que precede, el coeficiente de permeabilidad magnética del aire es igual a 1.

Circuito magnético. — Supongamos un anillo de hierro, en una región

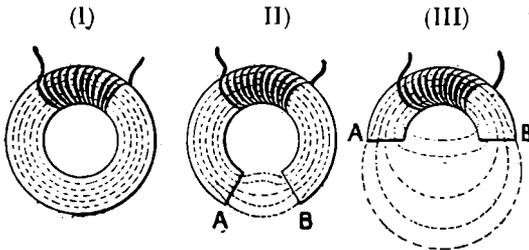


Fig. 822.

del cual está enrollado un carrete recorrido por una corriente (fig. 822); en el exterior, no se observa más que un campo muy débil; pero, a través el anillo, reina una inducción intensa.

Las líneas de inducción están cerradas sobre sí mismas a través del hierro.

Dícese que el anillo es un *circuito magnético*. Este circuito magnético

presenta cierta analogía con un circuito conductor recorrido por una corriente. La magnitud que corresponde a la intensidad de la corriente es el flujo de inducción a través de una sección del anillo. Este flujo tiene el mismo valor para todas las secciones, así como la intensidad de una corriente tiene un mismo valor en todos los puntos del circuito.

Además, la medida del flujo de inducción (842) indica que, en un mismo anillo, la intensidad del flujo depende solamente del *producto de la intensidad de la corriente por el número de espiras*: es decir que una espira en que circula una corriente de 10 amperios produce el mismo flujo que 10 espiras de una corriente de un amperio. Este producto se expresa en *amperios vueltas*; por ejemplo, 15 espiras de una corriente de dos amperios representan 30 amperios-vueltas. El número de *amperios-vueltas* desempeña, para el circuito magnético, el mismo papel que la fuerza electromotriz del generador de corriente, respecto al circuito eléctrico. Por esta razón se llama también *fuerza magneto-motriz*.

Finalmente, para el mismo número de amperios-vueltas, el flujo disminuye con la longitud del anillo y varía en razón inversa de esta longitud; además, es proporcional a la sección del anillo; disminuye si se sustituye el hierro por una sustancia menos permeable a las líneas de fuerza. En esto se reconocen causas análogas a las que hacen variar la resistencia de un circuito y, al mismo tiempo, la intensidad de la corriente. Por esto se dice que el circuito magnético tiene *resistencia magnética* o *reluctancia*. La reluctancia varía con la longitud y la sección del anillo según las mismas leyes que la resistencia eléctrica. Esta observación se debe a Hopkinson y Kapp.

Si se corta el anillo según AB (fig. 822, II y III), se hacen aparecer líneas de fuerza que atraviesan el aire. El circuito magnético *se cierra, pues a través del aire*. Al mismo tiempo, el flujo disminuye, como disminuye la intensidad de una corriente en un circuito en que se intercala una grande resistencia eléctrica. Por eso cuando se quiere obtener un flujo intenso, se debe reducir todo lo posible los *interferros*, es decir, los intervalos de aire entre las piezas de hierro. También es necesario dar a las piezas de hierro una sección tan grande como se pueda y poca longitud, a fin de disminuir su reluctancia. Por ejemplo, los electroimanes deben tener una forma todo lo recogida posible.

Fórmula del circuito magnético. — Consideremos el caso simple de un bocel rodeado de un carrete que tenga n vueltas de alambre por unidad de longitud del eje del bocel. Sea l la longitud de ese eje: el número total de espiras es $N = nl$. El campo interior creado por una corriente de intensidad electromagnética i que circula por el carrete, es $4\pi ni$. el flujo de inducción es, si llamamos S a la sección del bocel, y μ la permeabilidad de la substancia.

$$\Phi = 4\pi ni\mu S = 4\pi \frac{N}{l} i\mu S,$$

o

$$\Phi = 4\pi Ni : \frac{l}{\mu S}.$$

Si la intensidad de la corriente es I amperios, se debe sustituir, en esta fórmula, i por $\frac{I}{10}$, y así, se convierte en

$$\Phi = \frac{4\pi NI}{10} : \frac{l}{\mu S}$$

NI es el número de amperios-vueltas del carrete.

Esta fórmula es enteramente análoga a la fórmula de Ohm en la que $4\pi NI : 10$ representa la fuerza electromotriz, y por eso se llama a esta cantidad la *fuerza magnetomotriz*; $\frac{l}{\mu S}$ representa la resistencia y se la llama *resistencia magnética o reluctancia*. Se ve que ésta varía como la resistencia eléctrica: *proporcionalmente a la longitud l del circuito, en razón inversa de su sección S, y de un coeficiente específico μ que tiene la misma función que la conductibilidad eléctrica.*

827. Aplicaciones de los electroimanes. — La propiedad que tienen los electroimanes de dejar de ser activos cuando se suprime la corriente, se aplica a una multitud de aparatos, especialmente en los telégrafos y los timbres eléctricos que estudiaremos aparte.

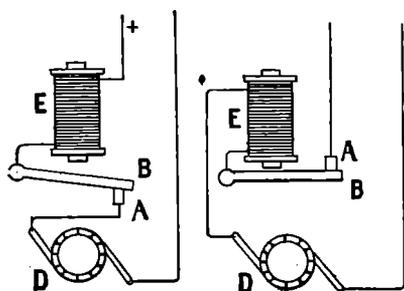


Fig. 823.

Fig. 824.

Disyuntores de máxima y de mínima. — Estos son unos aparatos automáticos que cortan la corriente cuando toma una intensidad que ofrece peligro. Reemplazan con gran ventaja los cortacircuitos fusibles. La figura 823 muestra *esquemáticamente* el funcionamiento de un disyuntor de máxima intercalado en el circuito de una dinamo D. El contacto se verifica entre una pieza fija A y una palanca B donde

está fija la armadura de un electroimán por el que pasa la corriente; mientras ésta no sea muy intensa, la palanca permanece en esa posición por su peso o por la acción de un resorte. Pero si la corriente aumenta demasiado, la atracción del electroimán es preponderante, la palanca se mueve hacia éste y corta el circuito.

Los *disyuntores de mínima* están destinados, por lo contrario, a cortar la corriente cuando toma una intensidad muy débil. Su construcción es enteramente semejante a los de *máxima*. La figura esquemática 824 basta para hacer comprender que la ruptura se verifica cuando resulta insuficiente la atracción del electroimán.

Cuando se destinan estos aparatos para corrientes intensas, la ruptura no proviene directamente del electroimán; sino que su acción deja entonces libre un interruptor solicitado por un fuerte resorte.

Aparatos de señales de los caminos de hierro. — Los aparatos que hacen funcionar las señales de seguridad de los ferrocarriles están gobernados por la acción eléctrica determinada por el paso de los trenes.

Electroimanes portadores. — La gran fuerza portadora de los electroimanes se ha aplicado a las *grúas* electromagnéticas, cuyo empleo se va generalizando cada vez más en las fábricas siderúrgicas. El electroimán, pendiente del gancho de una grúa ordinaria, no tiene más que un carrete interior, aislado con mica, rodeado de una especie de caja de acero, donde está fija una pieza polar anular.

Hay electroimanes capaces de levantar o llevar 20 toneladas, pero lo más general es que no pasen de 10 toneladas; en este caso el diámetro es de 1 m. 30 y el peso 2 400 kg., y funcionan con una corriente de 35 amperios bajo 220 voltios. Su aplicación principal consiste en sostener levantadas las piezas pesadas de hierro, fundición o acero, durante su transporte a los puentes rotatorios, y una vez allí no hay más que cortar la corriente y depositarlas. Esta maniobra resulta más rápida que con los aparatos ordinarios.

Ejemplo del cálculo de un electroimán de determinada fuerza portadora. — Supongamos, por ejemplo, que se quiere tener un electroimán en forma de herradura, de fuerza portadora de 1 000 kg o $P = 981\ 000\ 000$ dinas.

Se procurará realizar la inducción $\mathfrak{B} = 16\ 000$ gaus, porque es la más ventajosa; según la curva de la figura 819, sólo se obtendría una inducción apenas algo mayor aumentando mucho la corriente y, por consiguiente, gastando una cantidad de energía mucho más grande.

De la fórmula

$$P = \frac{\mathfrak{B}^2 S}{8\pi},$$

se deduce

$$S = \frac{8\pi P}{\mathfrak{B}^2} = \frac{8\pi \times 981\ 000\ 000}{16\ 000^2} = 96,3.$$

La sección del núcleo es $\frac{S}{2}$, de donde se deduce su diámetro 7,83 cm.

Además se tiene la longitud total del núcleo, inclusa la armadura, por ejemplo $l = 70$ cm. La fórmula del circuito magnético permite entonces calcular el número de amperios-vueltas necesarios. Tiénesse en efecto,

$$\Phi = \mathfrak{B}S = \frac{4\pi NI\mu S}{10l},$$

de donde

$$NI = \frac{10\mathfrak{B}l}{4\pi\mu}.$$

Tomando $\mu = 320$ que corresponde a $\mathfrak{B} = 16\ 000$, se tendrá $NI = 2\ 800$ amperios-vueltas (por ejemplo 280 espiras para 10 amperios).

828. Imantación del acero templado. — Imanes permanentes. — Colocado el acero templado en un campo magnético, se imanta más difícilmente que el hierro; pero su imantación obedece a leyes análogas, y, sobre todo, siempre está en la dirección del campo magnetizador. Cuando una barra de acero está imantada, conserva su imantación mucho mejor que el hierro dulce; por esta razón, el acero templado conviene para la fabricación de imanes permanentes. Los mejores aceros para este uso son los que contienen tungsteno.

Se imantan regularmente las barras de acero colocándolas en el eje de un carrete de hilo conductor por el cual se hace pasar una corriente: en él se desarrollan polos del mismo modo que en el hierro.

Para facilitar la imantación conviene interrumpir y restablecer varias veces la corriente.

Como el acero se presta menos que el hierro a la acción de un campo magnético, una barra de acero imantada no se desimanta instantáneamente por la influencia del campo desmagnetizador producido por sus propios polos. Sin embargo, no está enteramente exento de esta acción,

por lo cual la imantación de una barra de acero disminuye gradualmente.

Para conservar a los imanes sus propiedades magnéticas basta anular los efectos de los polos. En las barras rectas, se los dispone por pares (fig. 825), colocando los polos contrarios frente a frente; luego, se aplican contra los extremos, dos barritas de hierro dulce, las *armaduras*, en las que se desarrollan, por influencia, dos polos de nombres contrarios a los de los imanes y que anulan la acción desmagnetizadora de éstos. En los imanes de herradura, basta aplicar contra sus extremos una sola armadura de hierro dulce (fig. 826).

Imanes Jamin. — Sus estudios acerca de la distribución del magnetismo le han llevado a sustituir las gruesas láminas de acero que se usan para construir los imanes, por láminas muy finas fuertemente imantadas y fijas en piezas polares de hierro dulce (fig. 826). La fuerza portadora de estos imanes es mucho más grande

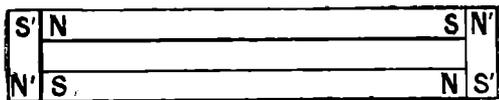


Fig. 825.

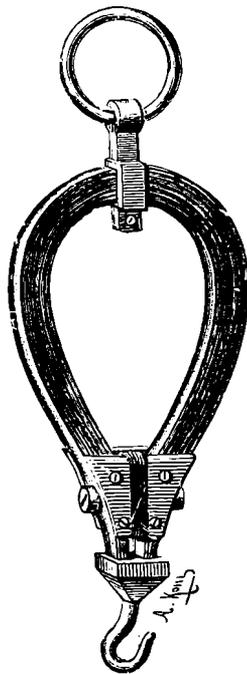


Fig. 826.

que la de un imán de acero macizo de iguales dimensiones. Jamin construyó así un imán capaz de portar 800 kilogramos*.

Saturación. — *Histéresis.* — El acero presenta, como el hierro, fenómenos de saturación magnética y de histéresis. La imantación del acero templado sigue, en un campo creciente, la misma ley (fig. 819) que la del hierro dulce. Se ve que, en igualdad de condiciones del campo magnetizador, la inducción creada en el acero es siempre menor que en el hierro; además, el valor máximo, aunque alcanzado por un campo mucho más intenso, no es mucho menos fuerte que en el hierro.

En la histéresis, la diferencia principal con el hierro dulce consiste en que, cuando se anula el campo después de haberle dado el valor O_b (fig. 820), el acero conserva una imantación que sólo desaparece por la influencia de un campo inverso que debe ser mucho más intenso que en el caso del hierro dulce. Este fenómeno se expresa diciendo que el acero ofrece mayor fuerza coercitiva que el hierro.

829. **Otras sustancias magnéticas.** — **Diamagnetismo.** — *Hierro fundido.* — El hierro fundido se imanta como el ordinario; pero más débilmente, en un campo de igual valor.

* Este imán, que figuró en la Exposición universal de 1867, se conserva en el Laboratorio de investigaciones físicas de la Sorbona.

Níquel y cobalto. — El níquel y el cobalto son los únicos que, después del hierro y sus derivados, gozan de la propiedad de imantarse notablemente, si bien con mucho menos intensidad.

Otros cuerpos. — Para manifestar el magnetismo de los demás cuerpos magnéticos, se suspende, entre las piezas polares de un fuerte electroimán, una barrita de la sustancia, si ésta es sólida, o un tubo que la contenga, si es líquida : se coloca en la dirección de la línea de los polos, al excitar el electroimán.

Cuerpos diamagnéticos. — Ciertos cuerpos así ensayados, principalmente el bismuto, se orientan perpendicularmente a la línea de los polos : llámense *diamagnéticos*; son *rechazados* por los imanes. Esto se debe a que se imantan, en un campo magnético, de modo inverso al de un cuerpo magnético. Por ejemplo, un trozo de bismuto colocado cerca del polo norte de un imán, adquiere un polo norte en su región más próxima y, por consiguiente, es repelido.

Las sustancias diamagnéticas son numerosas; entre ellas, citaremos, el bismuto, plomo, antimonio, zinc, cobre, cristal de roca, sal común, azufre, la cera, el agua y, en general, las sustancias orgánicas; pero la imantación inversa que adquieren es siempre muy débil.

830. Influencia de la temperatura. — Las propiedades magnéticas del hierro varían considerablemente con la temperatura. Un metal a la temperatura del rojo pierde su imantación; pero, a temperaturas más bajas, sufre fenómenos variados según la intensidad del campo magnetizador.

En un campo pequeño, que se mantenga constante, al elevarse la temperatura, la imantación aumenta; luego, desciende bruscamente a un valor muy pequeño para una temperatura de 700° a 800° y que varía según las diversas muestras. En campo intenso, la imantación disminuye regularmente cuando la temperatura se eleva.

La temperatura, próxima a 780°, a que el hierro pierde completamente su propiedad magnética, se denomina *temperatura crítica*; corresponde a una modificación profunda del metal y a la variación brusca de otras varias propiedades.

831. Constitución de los imanes. — **Teorías del magnetismo.** — *Experimento del imán roto.* — Si se rompe una aguja magnética (fig. 827),



Fig. 827.

se observa que cada mitad de la aguja se convierte en un imán completo, que tiene en sus dos extremos dos polos de nombres contrarios. Lo mismo ocurre si se rompen en dos partes estos nuevos imanes, y así sucesivamente, para toda división que pueda efectuarse. De ahí, se deduce que en el imán AB, cada partícula era un imán completo y que si sólo se observaba la acción magnética en los extremos de la aguja, es

porque los polos intermediarios, *a*, *b*, por hallarse yuxtapuestos, ejercían, al exterior, acciones que se anulaban mutuamente.

Este experimento permite imaginar una explicación de la constitución de los imanes. Se supone que las partículas de las sustancias magnéticas, no imantadas, son ya pequeños imanes; pero que estos imanes elementales no están orientados en una dirección única; de manera que la acción magnética exterior del conjunto es nula. Pero, si se coloca el cuerpo en un campo magnético, todos los imanes elementales se orientan en la dirección del campo y, por consiguiente, las propiedades del imán aparecen tales como las conocemos.

Esta hipótesis explica también el fenómeno de la saturación magnética. Se comprende, en efecto, que si el campo magnetizador es bastante intenso para que todos los imanes elementales se vuelvan paralelos, el efecto magnético exterior no puede aumentar ya.

Teoría de Ampère. — El conjunto de los experimentos efectuados en los solenoides demuestra que éstos se conducen exactamente como los imanes. De ahí, dedujo Ampère una teoría del magnetismo que hizo entrar todos los fenómenos magnéticos en el dominio de la electrodinámica.

Admitió la existencia de corrientes circulares alrededor de cada partícula de las sustancias magnéticas. Cuando estas sustancias no están imantadas, sus corrientes particulares se esparcen en todas direcciones, y la resultante de sus acciones electrodinámicas es nula; pero bajo la influencia de un campo magnético suficientemente intenso, estas corrientes se orientan y adquieren cierta posición de equilibrio, conforme a las leyes de la electrodinámica; el imán se convierte en un verdadero *haz de solenoides*, cuyo conjunto actúa como un solenoide único. Esta teoría no está en desacuerdo con la precedente, porque cada corriente particular sustituye a un pequeño imán cuya dirección de imantación es perpendicular al plano de la corriente (790).

Diferencia entre los solenoides y los imanes. — Entre los solenoides y los imanes existe una diferencia: que, en los primeros, los polos



Fig. 828.

están en los *mismos extremos*, mientras que, en los segundos, se hallan a *cierta distancia de los extremos*, distancia que aumenta con el diámetro de las barras.

Esta anomalía no está en contradicción con la teoría de Ampère. En efecto, los solenoides elementales son rectilíneos en la parte central de la barra; pero puede admitirse, como ha hecho notar Jamin, que se encorvan en sus extremos (fig. 828) a causa de la repulsión de sus polos de igual nombre; y entonces, la propiedad magnética se observa en las regiones extendidas, adonde llegan sus extremos.

CAPÍTULO X

INDUCCIÓN

832. **Corrientes inducidas. — Definiciones y leyes*.** — Cuantos experimentos vamos a exponer establecen las leyes generales siguientes :

1ª *Cuando un circuito cerrado se coloca en un campo magnético cualquiera y está atravesado por un flujo magnético variable, se origina en él una corriente, llamada corriente inducida, que tiene la misma duración que la varación del flujo.*

Este flujo variable se denomina *flujo inductor*.

2ª **LEY DE SENZ.** — *El sentido de la corriente inducida es tal que tiende a oponerse a la causa que lo engendra.*

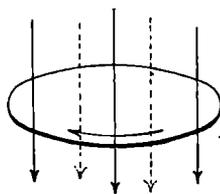
Esto quiere decir que la corriente inducida produce un flujo magnético del mismo sentido que el flujo inductor, cuando éste decrece, y de sentido contrario al del flujo inductor, cuando crece éste.

Regla de Maxwell. — Esta última ley puede expresarse también por medio de la siguiente regla práctica debida a Maxwell :

Si el flujo inductor disminuye, el sentido de la corriente inducida es el sentido en que debe girar un sacacorchos para que avance según las líneas de fuerza del campo inductor. Si aumenta el flujo inductor, el sentido de la corriente inducida es el sentido inverso de la rotación de un sacacorchos que avanza según las líneas de fuerza del campo inductor.

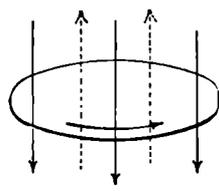
Las figuras 829 y 830 representan un circuito cerrado, instalado en un campo magnético inductor

cuyas líneas de fuerza están representadas en trazos continuos. La figura 829 se refiere al caso en que disminuye el flujo inductor. Entonces, produce en el circuito una corriente inducida en el sentido de la flecha. Se han trazado en líneas de puntos, las líneas de fuerza del campo de esta corriente inducida (790). Se ve que el flujo de la corriente inducida tiene el mismo sentido que el flujo inductor. La figura 830 se refiere al caso en que el flujo inductor aumenta. El flujo creado por la corriente inducida es, en este caso, de sentido contrario al flujo inductor.



*flux inducteur
décroit*

Fig. 829.



*flux inducteur
croît*

Fig. 830.

Las figuras 829 y 830 representan un circuito cerrado, instalado en un campo magnético inductor cuyas líneas de fuerza están representadas en trazos continuos. La figura 829 se refiere al caso en que disminuye el flujo inductor. Entonces, produce en el circuito una corriente inducida en el sentido de la flecha. Se han trazado en líneas de puntos, las líneas de fuerza del campo de esta corriente inducida (790). Se ve que el flujo de la corriente inducida tiene el mismo sentido que el flujo inductor. La figura 830 se refiere al caso en que el flujo inductor aumenta. El flujo creado por la corriente inducida es, en este caso, de sentido contrario al flujo inductor.

Fuerza electromotriz de inducción. — La corriente inducida que se establece en un circuito se debe a una fuerza electromotriz particular, llamada *fuerza electromotriz de inducción*, que se produce en el momento

* Los fenómenos de inducción fueron descubiertos por Faraday; en su exposición, no seguiremos el orden cronológico de su descubrimiento.

en que el flujo varía. Si el circuito no se cierra, cuando el flujo varía, la fuerza electromotriz de inducción crea, en los extremos del alambre inducido, una diferencia de potenciales eléctricos.

833. Inducción por el campo magnético terrestre. — Tomemos un carrete **B** (fig. 831), formado por un gran número de vueltas de alambre aislado y cuyos extremos comunican con los bornes de un galvanómetro **G**. Hagamos que el carrete sea móvil alrededor de un eje vertical; de este modo, sólo deberemos considerar el efecto de la componente horizontal del campo terrestre. Coloquemos primeramente el carrete en una posición inclinada sobre el meridiano magnético.

Si le hacemos girar un pequeño ángulo en el sentido de la flecha (fig. 831), el flujo inductor disminuye, porque las líneas de fuerza que

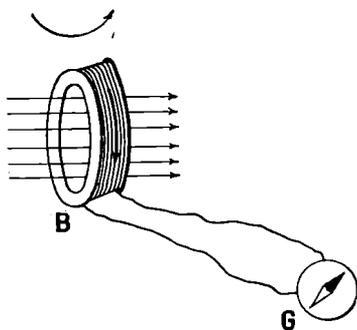


Fig. 831.

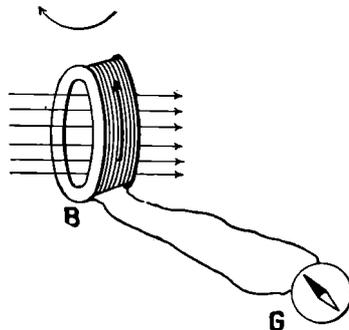


Fig. 832.

lo recorren se vuelven menos numerosas. Se observa que el galvanómetro indica una corriente, en el sentido de la flecha, la cual está conforme con la ley enunciada. Si hacemos girar un poco el carrete en sentido inverso (fig. 832), el flujo aumenta y se observa, con el galvanómetro, una corriente inducida de sentido inverso a la anterior.

Pero, si se mueve el carrete paralelamente a sí mismo, *sin hacerlo girar*, de modo que el flujo que lo recorre permanezca constante, se observará que el galvanómetro no indica ninguna corriente.

Se ve, pues claramente, que la corriente inducida sólo se produce cuando varía el flujo inductor.

OBSERVACIONES. — En estos experimentos, se emplea un carrete, porque, como se suman los efectos de la inducción sobre las espiras, las corrientes inducidas son de este modo lo bastante intensas para hacer desviar un galvanómetro medianamente sensible.

834. Inducción por un imán. — Acerquemos el polo norte **N** de un imán a un carrete **B** (fig. 833, I) unido a un galvanómetro: este indicará que en el carrete se produce una corriente en el sentido de la flecha. Según el sentido de las líneas de fuerza del imán, el flujo que recorre el carrete aumenta: el sentido de la corriente inducida está, pues, conforme con la ley general. Si se aleja el polo norte (fig. 833, II), se producirá necesariamente, en el carrete, una corriente inducida de sentido contrario al precedente.

Asimismo, se ve que si se acerca a B o se aleja de él un polo sur, las corrientes inducidas que se producen son de sentido contrario al de las producidas en el caso del polo norte.

835. Inducción por una corriente. — Los fenómenos de inducción son los mismos cuando se produce el campo inductor por medio de una corriente, que se llama entonces *corriente inductora*. De este modo,

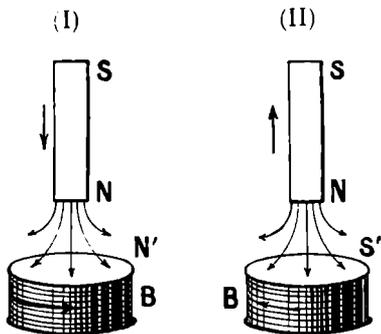


Fig. 833.

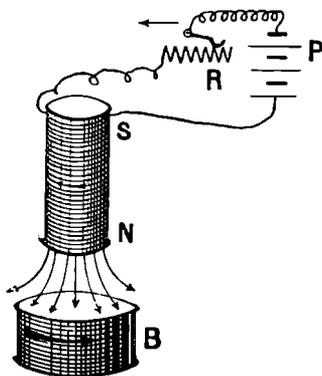


Fig. 834.

en el experimento anterior, se puede reemplazar el imán por un solenoide NS (fig. 834).

836. Trabajo resistente de las fuerzas electromagnéticas. — En todos estos experimentos, la variación del flujo, que es causa de la corriente inducida, se produce por un movimiento, ya del circuito con relación al campo, ya del sistema productor del campo con respecto al circuito. Entonces, se ejercen fuerzas electromagnéticas entre el aparato productor del campo magnético y la corriente inducida. Si se examinan todos los casos posibles, están comprendidos en la ley siguiente, que es una consecuencia de la ley de Lenz :

Las fuerzas electromagnéticas, que nacen del movimiento relativo de un circuito cerrado con relación a un campo magnético, resisten a este movimiento.

Así, cuando se acerca a un carrete B (fig. 833, I) el polo norte N de un imán, la corriente inducida se produce en tal sentido que el extremo N' del carrete se convierte en un polo norte que rechaza al polo N que se le acerca. Por el contrario, si se aleja el polo N, la corriente inducida tiene tal sentido que el extremo del carrete se convierte en un polo sur S' que atrae al polo N que se aleja.

La ley de Lenz está de acuerdo con el principio de la conservación de la energía. Para entretener la corriente inducida, que desprende energía calorífica en sus conductores y a la que, por otra parte, se puede hacer producir trabajos mecánicos o químicos, es necesario consumir trabajo. Este trabajo es el necesario para vencer las fuerzas electromagnéticas.

OBSERVACIONES. — 1º *Reciprocidad de la inducción y del electromagnetismo.* — Los fenómenos de inducción pueden considerarse como recíprocos de los fenómenos del electromagnetismo. En efecto, en estos

últimos, se puede obtener trabajo por medio de las fuerzas electromagnéticas que se ejercen entre un circuito recorrido por una corriente y otro sistema, de imanes o corrientes, productor de un campo magnético. Para esto, basta dejar que estas fuerzas muevan los cuerpos a que se aplican. En los fenómenos de inducción, se obtiene, al contrario, una corriente que produce su movimiento y cierra simplemente su circuito sobre sí mismo; pero la corriente tiene tal sentido que es menester consumir trabajo para producir el movimiento. Luego es de sentido contrario al que, en el experimento del electromagnetismo, hubiera ocasionado un movimiento igual.

Si, por ejemplo, en el aparato de la figura 797, se mueve con la mano el circuito, que se supone cerrado, de ABCD a A'B'C'D', se produce una corriente inducida de sentido inverso al marcado en la figura. Del mismo modo, si se cierra el circuito de una rueda de Barlow (fig. 796) y si se le da vueltas en el sentido de la flecha, se produce en el circuito una corriente que va a la rueda de O a A. En fin, veremos que los generadores industriales de corriente, fundados en la inducción, son *reversibles*; es decir, que pueden funcionar también como motores cuando se les dirige una corriente.

2° *Debilitamiento de un galvanómetro de corriente móvil.* — El debilitamiento de un galvanómetro de corriente móvil (814) se debe a la producción de corrientes inducidas en el bastidor del aparato, cuando este bastidor se mueve en el campo de un imán. Estas corrientes inducidas son según la ley de Lenz, de tal sentido que las fuerzas electromagnéticas ejercidas por el campo, resisten al movimiento.

837. *Expresión algebraica de la fuerza electromotriz de inducción.* — Supongamos un circuito cerrado que se mueve o que se deforma en un campo magnético. La experimentación nos ha enseñado que en un momento dado se produce en él una corriente, cuya intensidad designaremos por I amperios. Consideremos un intervalo de tiempo Δt , suficientemente pequeño para que, mientras dure, permanezca constante la intensidad y sea $\Delta\Phi$ la variación del flujo magnético a través del circuito durante este tiempo. El trabajo de las fuerzas electromagnéticas se expresa por la fórmula

$$\Delta\mathcal{G} = \frac{I\Delta\Phi}{10^8} \text{ julios (807).}$$

Al mismo tiempo, la corriente inducida ha producido $I\Delta t$ culombios. La fuerza electromotriz de inducción es, pues

$$e = \frac{\Delta\mathcal{G}}{I\Delta t} \quad (737).$$

o

$$e = \frac{1}{10^8} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Si la variación del flujo no es proporcional al tiempo, se debe introducir la derivada del flujo con relación al tiempo. Luego

$$e = \frac{1}{10^8} \frac{d\Phi}{dt}. \quad [1]$$

Tal es la expresión, en voltios, de la fuerza electromotriz de inducción en el momento t : ésta es general y se aplica a todos los casos de inducción (840).

838. *Inducción en circuito abierto.* — Una fuerza electromotriz de inducción elemental se produce en todo elemento de circuito que se mueve en un campo magnético cortando las líneas de fuerza de este campo; porque estas son las condiciones en que las fuerzas electromagnéticas pueden desempeñar su trabajo. Sea $\Delta\tau$ el flujo cortado por el elemento de circuito en el tiempo Δt : si el circuito está cerrado, una demostración idéntica a la

anterior demuestra que la fuerza electromotriz de inducción elemental es $\frac{1}{10^9} \frac{\Delta \mathcal{E}}{\Delta t}$. Si el elemento de conductor no forma parte de un circuito cerrado, establécese entre sus dos extremos una diferencia de potenciales V^* que equilibra la fuerza electromotriz de inducción y es igual a ella. Luego

$$V = \frac{1}{10^9} \frac{\Delta \mathcal{E}}{\Delta t}.$$

Por otra parte, también puede comprobarse por experimentación.

839. *Ley de Neumann.*— *La cantidad de electricidad inducida, para una variación dada del flujo inductor, es independiente de la duración de esta variación.*

Esta ley puede demostrarse experimentalmente. Si, por ejemplo, se mueve un imán, ante un carrete unido a un galvanómetro, desde una misma posición inicial a una misma posición final, más o menos rápidamente, se verá que la desviación de la aguja del galvanómetro es la misma **.

Demostración teórica. — Sean, en un momento dado, e la fuerza electromotriz de inducción y r la resistencia del circuito. La intensidad de la corriente es

$$i = \frac{e}{r} = \frac{1}{10^9} \cdot \frac{1}{r} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

La cantidad de electricidad suministrada durante el tiempo Δt , después del momento t , es

$$\Delta q = i \Delta t = \frac{1}{10^9} \cdot \frac{1}{r} \cdot \Delta \Phi.$$

Si se suman las cantidades de electricidad, en el movimiento total, esta suma será igual a

$$q = \frac{1}{10^9} \cdot \frac{1}{r} \cdot \Sigma \Delta \Phi.$$

Y llamando Φ , al valor final del flujo y Φ_0 a su valor primitivo, tendremos

$$q = \frac{1}{10^9} \frac{1}{r} (\Phi_1 - \Phi_0) \text{ culombios.}$$

Aplicación a la graduación de un galvanómetro balístico. — Consideremos un carrete y supongamos que se haya valorado la suma S de las superficies de sus espiras. Coloquemos este carrete sobre una mesa horizontal y unámonle al galvanómetro balístico estudiado. Volvamos cara por cara el carrete, y veremos que se desvia la aguja del galvanómetro. Sea δ_0 la desviación. En este experimento, el carrete estaba, al principio, recorrido por un flujo SV , debido a la componente vertical del campo terrestre. Al final del experimento, este flujo penetraba por la cara opuesta del carrete. Luego la variación del flujo es $2SV$ y la cantidad de electricidad inducida,

$$q_0 = \frac{1}{10^9} \cdot \frac{2SV}{r}.$$

siendo r la resistencia total del circuito, que puede medirse fácilmente. Si, ahora, en cualquier experimento en que se haya usado un galvanómetro balístico, ha sufrido éste una desviación δ , es que había sido recorrido por una cantidad de electricidad q tal que

$$\frac{q}{q_0} = \frac{\delta}{\delta_0}; \text{ de donde } q = \frac{q_0}{\delta_0} \delta.$$

La relación $\frac{q_0}{\delta_0}$ se denomina *constante* del galvanómetro balístico.

840. **Inducción por variación del flujo sin movimiento.** — Se puede variar el flujo a través del circuito, sin ningún movimiento del circuito inducido o del sistema inductor. Pongamos, por ejemplo, en las inme-

* Esta diferencia de potenciales puede manifestarse uniendo AB a un electrómetro sensible, por ejemplo, a un electrómetro capilar (948).

** Es preciso que el galvanómetro no se debilite y que la duración del experimento sea, en todos casos, pequeña con relación al período de oscilación de la región móvil del galvanómetro.

diciaciones de un carrete B (fig. 834), unido a un galvanómetro, otro carrete NS recorrido por la corriente de una pila. Por medio de un reóstato R aumentemos o disminuyamos la intensidad de la corriente en NS, con lo cual aumentaremos o disminuirémos el flujo que atraviesa B y producirémos en él corrientes inducidas. La experimentación demuestra que estas corrientes están siempre en el sentido indicado por la ley general. La figura se refiere al caso en que crece la corriente inductora.

Del mismo modo se obtienen corrientes inducidas cuando, no existiendo la corriente en NS, se la establece; en este caso, el flujo, que era nulo a través de B, aumenta. Del mismo modo, cuando se suprime la corriente en NS, el flujo a través de B se anula y, en B, se produce una corriente inducida de sentido contrario al de la anterior.

OBSERVACIÓN. — Este mecanismo permite demostrar que la cantidad de electricidad inducida por una variación dada del flujo es independiente, no sólo de la velocidad con que el flujo varía (839), sino también de la causa que ha producido la variación del flujo.

Por ejemplo, estando el carrete NS en la posición que indica la figura y atravesándolo la corriente inductora, alojémosle y se verá que la aguja del galvanómetro balístico unido a B experimentará cierta desviación. Volvamos a colocar el carrete en su primitiva posición y suprimamos la corriente inductora, y el experimento indicará que la desviación del galvanómetro es la misma que en el caso anterior. En ambos casos, la variación del flujo, a través de B, es la misma.

Igual desviación se obtendría, ya estableciendo la corriente en el carrete NS, colocado en su posición final, ya llevando este carrete, una vez recorrido por la corriente, de una posición lejana a la misma posición final. También, en este caso, la variación del flujo ha sido la misma en los dos modos de operar.

De ahí se deduce que la fórmula dada (837) para expresar la fuerza electromotriz de inducción es general y que se aplica sea cual fuere la causa que produce la variación del flujo.

841. Influencia del hierro en los fenómenos de inducción. — Como la presencia del hierro en un campo magnético aumenta considerablemente el flujo a través de toda superficie contenida en el campo, es de esperar que esta presencia aumenta también los fenómenos de inducción, como, en efecto, ocurre. Si, en el experimento de la figura 834, se acompaña al carrete inductor o al inducido, o a ambos, núcleos de hierro dulce, se verá que las corrientes inducidas aumentan considerablemente de intensidad.

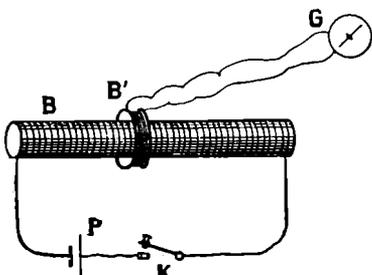


Fig. 835.

842. Medida del flujo de inducción, de la inducción magnética y del coeficiente de permeabilidad. — Supongamos un solenoide B (fig. 835) recorrido por una corriente y rodeémosle de un pequeño carrete B', unido a un galvanómetro balístico. Suprimamos de repente la corriente en B, por medio de un interruptor K; el galvanómetro G se desviará y su desviación permitirá calcular, por la fórmula [2] el flujo φ que atravesaba la sección del solenoide B.

Introduzcamos en B, una barra de hierro dulce o de acero, que lo llene exactamente. Si repetimos el mismo experimento, veremos que la desviación del galvanómetro aumenta considerablemente. La cantidad Q de electricidad que ésta mide nos sirve para calcular, por la fórmula [2], cuál era el valor Φ del nuevo flujo a través del carrete: es la suma del flujo primitivo φ y del flujo de inducción

Φ' a través del hierro. So tiene pues $\Phi' = \Phi - \varphi$; pero, como generalmente φ es muy pequeño respecto de $\Phi\Phi'$, entonces es casi igual a Φ . El cociente de Φ' por la sección S del solenoide da el valor de la inducción β . El cociente de Φ por φ es el coeficiente de permeabilidad del hierro.

Inducción en una barra imantada. — Sustituyamos, en el experimento anterior, el solenoide B por una barra imantada. Retirémosla bruscamente del carrete B'. El galvanómetro se desvía y su desviación permite calcular el flujo de inducción que atravesaba la barra (806).

843. **Medida de la intensidad de un campo magnético.** — Supongamos que se trata de medir la intensidad del campo magnético que existe entre los polos de un electroimán. Colócase en el campo, perpendicularmente a las líneas de fuerza, un pequeño carrete plano, unido a un galvanómetro, y se aleja bruscamente este carrete, llevándolo fuera del campo. De la desviación del galvanómetro, se deduce la cantidad q de electricidad suministrada por la corriente inducida. Si representamos por H la intensidad del campo; por S, la superficie total de las espiras del carrete y por r , la resistencia total del circuito, como la variación del flujo ha sido HS, tendremos :

$$\frac{1}{10^8} \frac{HS}{r} = q; \quad \text{de donde} \quad H = \frac{qr}{S} 10^8.$$

844. **Self-inducción.** — Si se establece la corriente en un circuito, se produce una fuerza electromotriz de inducción en sentido contrario, a la corriente que se establece; esto se comprende porque el flujo que atraviesa el circuito crece.

Tal fenómeno ha recibido el nombre de *inducción propia del circuito* o *self-inducción*. Su efecto es pequeño en un circuito rectilíneo; pero se vuelve grande en un carrete, sobre todo, si posee un núcleo de hierro dulce. De ahí resulta que la intensidad de una corriente no se establece instantáneamente. En un carrete fuerte con núcleo de hierro, el retraso puede ser de varios segundos.

Del mismo modo, si se aumenta la intensidad de la corriente en un carrete, se produce en él una fuerza electromotriz de self-inducción, inversa de la corriente y que impide que ésta crezca bruscamente. Recíprocamente, si se disminuye la intensidad de la corriente, disminuye también el flujo y se produce una fuerza electromotriz de self-inducción de igual sentido que la corriente y que impide que ésta decrezca bruscamente.

Si, en fin, se interrumpe de repente la corriente en un circuito, el flujo a través de este circuito disminuye rápidamente y se produce en él una gran fuerza electromotriz de self-inducción. Esta fuerza electromotriz basta para prolongar la corriente primitiva, provocando una chispa eléctrica en el sitio de la ruptura. Obsérvanse fuertes *chispas de ruptura* siempre que se suprime una corriente que circulaba por un aparato que contenga carretes con núcleos de hierro.

Coficiente de self-inducción. — Llámase *coeficiente de self-inducción* L de un circuito, al flujo de inducción que atraviesa este circuito cuando está recorrido por una corriente que tenga la unidad de intensidad de corriente.

Si la unidad de corriente elegida es la unidad electromagnética, L queda valuada en unidades electromagnéticas. Prácticamente, se toma por unidad de coeficiente de self-inducción, el *henry*, que vale 10^9 unidades electromagnéticas.

845. Corrientes de Foucault. — Las corrientes de Foucault son corrientes inducidas que se producen, no ya en circuitos formados por alambres, sino en masas metálicas que se mueven en un campo magnético de intensidad constante, o bien que se mantienen fijas en un campo de intensidad variable. En el primer caso, obedecen a la ley de Lenz. De ahí resulta que si se quiere mover una masa de metal en un campo magnético intenso, por ejemplo, entre los polos de un electroimán poderoso, se encuentra notable resistencia. Al mismo tiempo, la masa de metal se calienta por la influencia de las corrientes de que es el centro.

Las corrientes de Foucault son perjudiciales en las máquinas electromagnéticas. Para evitarlas, se constituyen las piezas en que pudieran desarrollarse, con alambres de hierro o placas de tela metálica cubiertos con un barniz aislador.

CAPÍTULO XI

UNIDADES ABSOLUTAS ELECTROMAGNÉTICAS PRINCIPIOS DE LAS MEDIDAS ABSOLUTAS

846. Unidades electromagnéticas cegesimales. — En lo que precede, hemos encontrado cierto número de magnitudes : intensidad de una corriente, cantidad de electricidad, fuerza electromotriz, diferencia de potenciales, resistencia eléctrica, que hemos medido respectivamente en amperios, culombios, voltios y ohmios.

El conjunto de estas unidades, a las cuales añadiremos la unidad de capacidad eléctrica (928) el *faradio*, forma el *Sistema práctico de unidades eléctricas*, que es el generalmente empleado en los cálculos industriales.

Se diferencia algo de otro sistema, más inmediatamente ligado a las unidades mecánicas cegesimales y llamado *sistema electromagnético cegesimal*. Además, entre las unidades del sistema práctico y las del electromagnético existen sencillas relaciones que sólo se diferencian unas de otras por potencias de 10.

847. Diversas unidades del sistema electromagnético cegesimal. — Este sistema se funda en la definición de la unidad de masa magnética (694) y de la unidad de intensidad del campo magnético (697).

1º Ya hemos visto (793) que de estas unidades se deduce la unidad electromagnética de intensidad de corriente. Sabemos que esta unidad vale 10 amperios. Luego : *un amperio vale 10^{-1} unidad cegesimal*.

2º *Unidad electromagnética de cantidad de electricidad.* — La unidad electromagnética de cantidad de electricidad es : *la cantidad de electri-*

cidad producida en un segundo por una corriente de intensidad igual a la unidad electromagnética.

Se ve fácilmente que la unidad electromagnética de cantidad de electricidad vale 10 culombios; puesto que un culombio es la cantidad de electricidad suministrada por un amperio (o $\frac{1}{10}$ de unidad absoluta de intensidad) en un segundo. Por consiguiente, 1 culombio vale 10^{-1} unidad cegesimal.

3º *Unidad cegesimal electromagnética de fuerza electromotriz.* — Es la fuerza electromotriz de un generador de corriente que da a la corriente 1 ergamia por cada unidad de cantidad de electricidad que la recorre.

Un voltio proporciona 1 julio o 10^7 ergamias a un culombio; por lo tanto, proporcionaría 10^8 ergamias a una unidad electromagnética cegesimal de cantidad de electricidad, que vale 10 culombios. En consecuencia, un voltio vale 10^8 unidades electromagnéticas cegesimales.

4º *Unidad cegesimal electromagnética de resistencia eléctrica.* — Es la resistencia de un conductor en que una corriente, que tenga la unidad electromagnética de intensidad, desprende, en un segundo, una cantidad de energía calorífica equivalente a una ergamia.

En un ohmio, 1 julio, o 10^7 ergos, son desprendidos en 1 segundo por una corriente de un amperio o $\frac{1}{10}$ C. G. S. Una corriente de intensidad 1 C.G.S. desprendería 100 veces más energía calorífica, es decir 10^9 ergamias. Por consiguiente, 1 ohmio vale 10^9 unidades C.G.S. electromagnéticas.

5º *Unidad cegesimal electromagnética de diferencia de potenciales.* — Se confunde con la unidad de fuerza electromotriz.

848. Expresiones de las leyes de la corriente eléctrica. — Las leyes fundamentales de la corriente se interpretan por las mismas fórmulas en ambos sistemas de unidades :

1º *Energía producida por un generador de corriente.* — Si un generador, que tenga una fuerza electromotriz e C.G.S., produce una corriente i C.G.S. en el tiempo t segundos, proporciona una energía eit ergos.

2º Si una corriente i C.G.S. pasa a un conductor de resistencia r C.G.S. en t segundos, desprende una cantidad de energía calorífica equivalente a

$$ri^2t \text{ ergos.}$$

3º Si un generador de fuerza electromotriz e C.G.S. produce una corriente en un circuito de resistencia total R C.G.S., la intensidad de esta corriente es, en unidades cegesimales,

$$i = \frac{e}{R}.$$

4º Entre los dos extremos de un alambre de resistencia r C. G. S., recorrido por una corriente i C.G.S., existe una diferencia de potenciales

$$V = ri \text{ unidades C. G. S.}$$

Estas fórmulas se demostrarían en el sistema cegesimal electromagnético, lo mismo que hemos hecho en el sistema práctico.

849. Principios de las medidas absolutas. — 1º Ya hemos visto cómo se mide una intensidad de corriente, sea en amperios, sea en unidades electromagnéticas (815, 816).

2º *Medida absoluta de una resistencia.* — *Determinación del ohmio.* — Para medir una resistencia en valor absoluto, se emplean diversos métodos. El más exacto es el ideado por Lippmann, que constituye un perfeccionamiento del indicado por Lorentz.

El aparato es un electrodinamómetro absoluto (816) en el cual el carrete interior gira con una velocidad angular ω . El carrete exterior solo está atravesado por una corriente i unidades electromagnéticas, que atraviesa también la resistencia r por medir y que produce, entre los dos extremos de esta resistencia r , una diferencia de potenciales ri . En el carrete interior, produce una fuerza electromotriz de inducción, variable a cada momento. Designemos por S la superficie de una espira del carrete móvil; por N , el número de estas espiras y por n el número de espiras del carrete fijo por cada centímetro de longitud. La expresión del flujo que recorre el carrete móvil, cuando su eje forma con el del carrete mayor el ángulo $\alpha = \omega t$, es :

$$\Phi = (4\pi ni) \cdot (NS) \cos. \omega t.$$

Por consiguiente, la fuerza electromotriz de inducción nos la da, en unidades electromagnéticas, la fórmula

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = -4\pi niNS\omega \text{ seno } \omega t.$$

Dicha fuerza es máxima y su valor absoluto es $e_0 = 4\pi niNS\omega$, cuando el ángulo $\omega t = \alpha$ es igual a $\frac{\pi}{2}$, es decir, cuando el eje del carrete interior es perpendicular al eje del carrete fijo.

En contactos convenientemente dispuestos, en el momento en que la fuerza electromotriz es máxima, se la opone a la diferencia de potencial ri por un aparato análogo al de la figura 781, que comprende un galvanómetro sensible. Se hace variar ω hasta que no se desvie el galvanómetro. Entonces, tenemos :

$$ri = e = 4\pi niNS\omega, \quad \text{de donde} \quad r = 4\pi nNS\omega.$$

Como todas las magnitudes que entran en el segundo miembro pueden medirse, se deduce de ellas el valor de r en unidades cegesimales. Su valor en ohmios, es $\frac{r}{10^9}$.

Después, una vez que se tiene una resistencia r conocida, se le pueden comparar otras resistencias, por el método del puente de Wheatstone (783), y, en particular, puede determinarse las dimensiones que hay que dar a una columna de mercurio para que tenga, a 0º, una resistencia igual a 1 ohmio (763).

3º *Fuerzas electromotrices.* — Para tener la fuerza electromotriz de una pila tipo en valor absoluto, basta emplear el aparato ya descrito (786) : se miden r e I en valor absoluto, y resultará $e = rI$. Si r e I están expresadas en ohmios y en amperios, e resultará calculada en voltios. Si r e I se expresan en unidades cegesimales, e quedará también calculada, por esta fórmula, en unidades cegesimales.

Luego, pueden determinarse las fuerzas electromotrices de las diversas pilas por comparación con la pila tipo.

CAPÍTULO XII

MÁQUINAS GENERATRICES DE CORRIENTE CONTINUA. MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA

850. Máquinas generatrices de corriente continua. — 1º *Definiciones.* — Las primeras máquinas de corriente continua empleadas en la industria fueron inventadas por Gramme. Todas estas máquinas com-

prenden un circuito, movable en un campo magnético, y en el cual se desarrollan corrientes inducidas; se llaman máquinas *dinamo-eléctricas* o simplemente *dinamos*; en ellas, el campo magnético inductor está producido por un electroimán (fig. 840). También se construyen máquinas llamadas *magneto-eléctricas* (o simplemente *magnetos*) en que el campo magnético está producido por un imán (fig. 836); pero estas sólo son aparatos de demostración.

2º *Anillo de Gramme*. — El órgano esencial es un anillo de hierro dulce (fig. 837) inventado por Gramme, sobre el cual se arrolla un circuito formado por cierto número de carretes reunidos en serie. Los puntos de unión sucesivos de los carretes están ligados a piezas de cobre, aisladas una de otra en la superficie de un cilindro compuesto de materia aisladora. La figura 838 es el esquema de este aparato, en que sólo figuran 6 carretes; la figura 837 indica la verdadera disposición de los carretes.

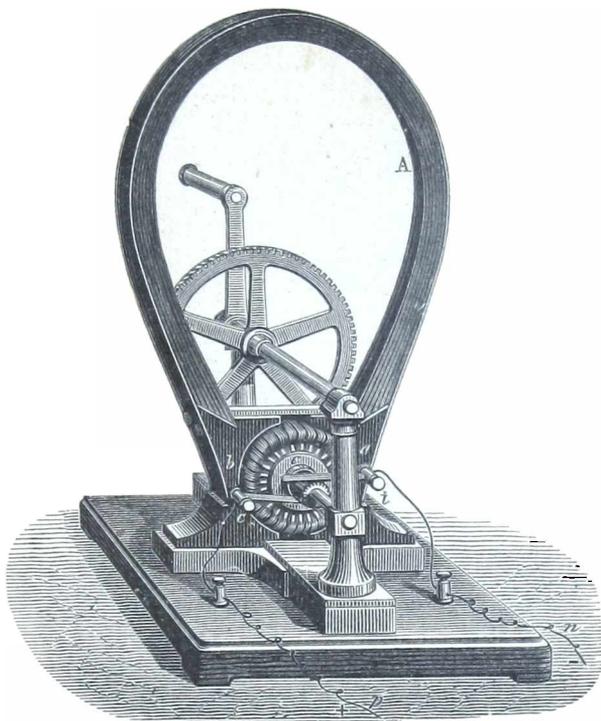


Fig. 836.

El conjunto de las piezas *m* (fig. 837) constituye el órgano llamado *colector*.

En dos puntos diametralmente opuestos del colector, y en el plano perpendicular a la línea de los polos del imán, se apoyan dos piezas, generalmente de carbón conductor, llamadas *escobillas*, porque, al principio, se constituían por una especie de escobas de alambres de cobre. Estas escobillas *A* y *B* se ponen en comunicación con el circuito exterior *C* (fig. 838), en el cual debe la máquina mantener una corriente continua. Para producirla, basta comunicar un movimiento de rotación rápido al anillo.

3º *Generación de la corriente*. — He aquí cómo se puede explicar la generación de esta corriente. Gracias a la gran permeabilidad magnética del hierro, las líneas de fuerza del campo magnético, en vez de ir directamente del polo norte al polo sur, se doblan para atravesar el anillo (fig. 838). Si se hace girar el anillo en el sentido de la flecha, se ve que en todos los carretes tales como *a* y *b*, aumenta el flujo magnético. De ahí resultan, en estos carretes, fuerzas electromotrices de

inducción cuyo sentido indican las flechas. Por el contrario, en carretes tales como d y e disminuye el flujo; y resultan fuerzas electromotrices de inducción, el sentido de las cuales se indica también. En un momento dado, sùmanse las fuerzas electromotrices en todos los carretes que están a un mismo lado del plano PQ perpendicular a la línea de los polos del imán inductor, y las dos series de carretes que

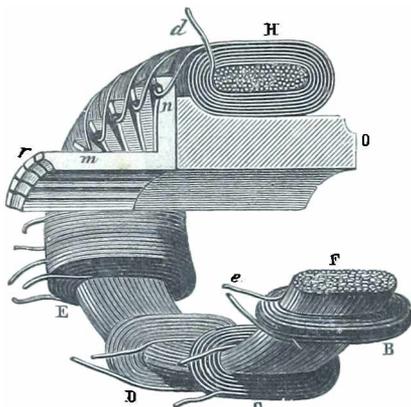


Fig. 837.

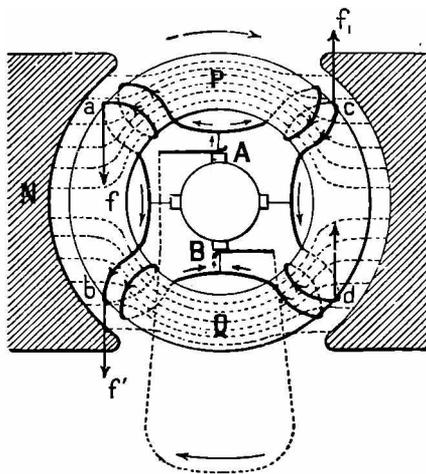


Fig. 838.

están a una y otra parte de PQ tienden a producir, en el circuito exterior C , una corriente de igual sentido.

Después, cada vez que un carrete atraviesa el plano PQ , el flujo que lo atraviesa es máximo y, durante un momento, no se produce fuerza electromotriz; un momento después, prodúcese una fuerza electromotriz inversa de la que antes se producía. Pero, sea cual fuere la posición del anillo, nada cambia en el circuito exterior, y, como los carretes son suficientemente numerosos para que la escobilla pueda apoyar constantemente contra una tecla del colector, la corriente producida en el circuito exterior es continua y conserva una intensidad, poco más o menos, constante.

4º *Variaciones de la corriente.* — La corriente sufre necesariamente pequeñas variaciones de intensidad. Por ejemplo, cada vez que una escobilla se pone en contacto con dos teclas consecutivas del colector, se elimina un carrete de la serie; puesto que se cierra sobre sí mismo. Además, los carretes suprimidos se encuentran en las regiones más débiles del campo; por otra parte este efecto se atenuará tanto más, cuanto mayor número de carretes tenga el inducido.

5º *Modo de calzar las escobillas.* — Las escobillas colectoras no deben colocarse exactamente en el plano perpendicular a la línea de los polos, como exige la teoría precedente; sino que deben moverse, o, como generalmente se dice, *descalzarse*, según $A'B'$, (fig. 839) un cierto ángulo en el sentido de la rotación.

Es porque, en realidad, el campo total resulta del campo inductor y del que produce la corriente del inducido. La composición de los dos campos tiene por efecto torcer las líneas de fuerza primitivas en el sentido del movimiento é impulsar los puntos en que la fuerza electromotriz inducida es nula cierto ángulo en el expresado sentido. En la práctica, se mueven los sistemas de las dos escobas de manera que las chispas dejen de saltar entre ellas y el colector. La *línea neutra* $A'B'$ forma con su posición teórica

AB un ángulo más o menos grande *que puede llegar a 10°* para grandes velocidades. Este ángulo depende, por lo demás, de la intensidad de la corriente, lo que exige un arreglo cuando se cambia el régimen de la máquina. Se le efectúa actuando sobre un mango que gobierna las escobas.

6° *Inducido de tambor.* — Las porciones de alambre interiores al anillo son inútiles, desde el punto de vista de la inducción, porque no cortan a ninguna línea de fuerza; además, son perjudiciales, porque introducen una resistencia en el circuito. Para suprimirlas, se reemplaza, con frecuencia, el anillo, por un cilindro macizo, cubierto de carretes arrollados en longitud y cuyos extremos comunican respectivamente con dos teclas próximas al colector. Esto es como no conservar, en los carretes *a* y *b*, por ejemplo (fig. 838), más que las porciones exteriores de las espiras. De este modo se constituye un *inducido de tambor*, cuyo funcionamiento se explica tan fácilmente como el del anillo.

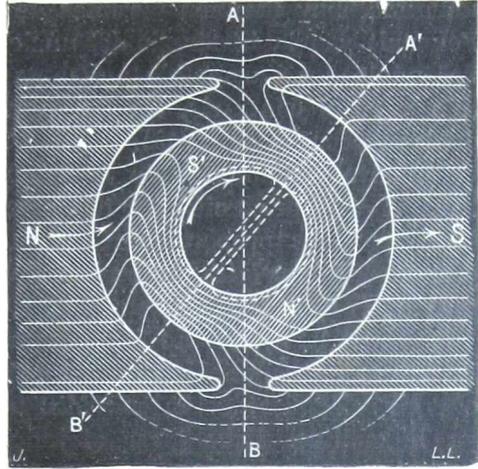


Fig. 839.

851. Trabajo necesario para

mover la máquina. — Conforme con la ley de Lenz, la máquina no puede producir corriente sin que se desarrollen fuerzas que resistan al movimiento. Las únicas porciones de las espiras en que se deben notar estas fuerzas son las partes de alambre tales como *a*, *b*, *c* (fig. 838), perpendiculares al plano de la figura.

El sentido de las fuerzas a que éstas se hallan sometidas en el campo magnético está indicado en la figura, según la ley de Laplace (796). Se ve que estas fuerzas resisten al movimiento*: luego para producir una corriente en la máquina, se necesita consumir trabajo.

Fuerza electromotriz y potencia. — La máquina tiene una fuerza electromotriz *e* voltios; sean *r* la resistencia exterior y *r'* la resistencia de la máquina: la intensidad de la corriente es $i = \frac{e}{r + r'}$ (de donde $e = ri + r'i$). El descenso de potencial *V* entre los polos es

$$V = ri, \quad \text{o} \quad V = e - r'i.$$

La potencia total de la máquina es $W_0 = ei$ vatios (738). Pero lo más importante es la potencia *W* que puede rendir en un circuito exterior.

Ésta es igual a *Vi*.

Por consiguiente $W = Vi = ei - r'i^2$.

W difiere de W_0 en una cantidad igual a la potencia $r' i^2$ que corresponde al desprendimiento de calor en la máquina.

Rendimiento. — La energía eléctrica *Vi* comunicada por la máquina

* Las partes de alambre que están dentro del anillo, no están sujetas a fuerzas notables, porque, por razón de la permeabilidad magnética del hierro, es poco intenso el campo magnético que existe en esa región. En cuanto a las partes de alambre que están delante o detrás del plano de la figura, están sujetas a fuerzas dirigidas paralelamente al eje de rotación, las cuales se equilibran.

es siempre menor que la que se gasta para hacerla girar. En efecto, aparte de la pérdida de energía, bajo forma de calor desprendido en la máquina, hay también pérdidas de energía debidas a las corrientes de Foucault y a la histéresis del núcleo de hierro. En efecto, cada sección del núcleo está sometida a imantaciones alternativamente en un sentido y en el contrario. En fin, hay que añadir las pérdidas de energía debidas a los frotamientos.

Llábase *rendimiento* de la máquina al cociente de la potencia eléctrica $W = Vi$ producida por ella exteriormente por la potencia mecánica W_m que debe proporcionarle un motor para hacerla dar vueltas. Las dinamos industriales modernas tienen, en general, muy buen rendimiento, el cual puede llegar al 95 por 100.

852. **Construcción de las dinamos de corriente continua.** — Las máquinas dinamo-eléctricas, destinadas siempre a producir gran energía eléctrica, están movidas por un motor potente, ya de vapor, ya hidráulico. Hace girar el inducido por medio de una correa de transmisión que pasa por una polea calzada en el árbol del inducido. Estas máquinas se destinan a usos muy variados : alumbrado eléctrico, transporte de fuerza, galvanoplastia. Tan pronto se les exige una fuerza electromotriz bastante elevada, 110 voltios y más, con una intensidad relativamente pequeña; como se les pide poca fuerza electromotriz, con gran intensidad, como ocurre en la galvanoplastia : en este caso, el alambre debe ser grueso y corto.

Las primeras dinamos estaban construidas de un modo análogo a la magneto de Gramme. El campo inductor era un electroimán de herradura. Las figuras 840, 841 y 842 representan esquemáticamente el tipo de estas máquinas, que se llaman dinamos bipolares, porque no tienen más que dos polos.

Excitación de los inductores. — Los carretes del electroimán, que se llaman *inductores*, a veces son accionados por la corriente independiente ya de una batería de acumula-

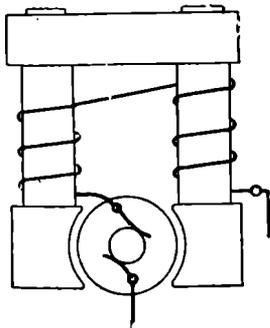


Fig. 840.

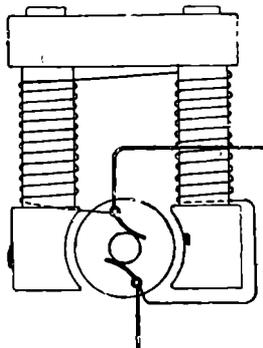


Fig. 841.

dores, ya de otra dinamo, denominada *excitadora*; pero, por lo común, se toma la corriente de excitación de la máquina misma, que, entonces, se llama *auto-excitadora*. Este último sistema de excitación se hace posible por el efecto del magnetismo remanente de los polos inductores. Cuando se pone la máquina en marcha, este magnetismo remanente produce una corriente poco intensa, al principio; pero que va en aumento.

1º *Excitación en serie.* — Esto es el caso en que el alambre arrollado sobre los inductores es la continuación del que constituye el inducido (fig. 840). Hay evidentemente interés en tomar entonces como circuito inductor un conductor poco resistente. Este modo de excitación que presenta la ventaja de ser el más sencillo, tiene varios inconvenientes.

Si la resistencia exterior es demasiado grande, la máquina no se carga.

Si, dada velocidad constante, la resistencia exterior disminuyera cada vez más, la intensidad de la corriente aumentaría en la misma cantidad y el alambre del inducido podría ser quemado por el efecto Joule. Evítase este accidente intercalando *cortacircuitos*.

Cuando se quiere parar una máquina excitada en serie, importa introducir progresivamente resistencias en el circuito o, si se prefiere hacerlo así, derivar sobre el alambre inductor resistencias decrecientes, de modo que se debilita poco a poco la corriente de excitación: la parada brusca provocaría efectos de inducción reflejo peligrosos para la conservación de la máquina. Esto se logra usando *reóstatos*.

2º *Excitación en derivación.* — Se excita la máquina en derivación disponiendo el alambre de los inductores en derivación sobre el alambre inducido. Se ve (fig. 841) que los extremos del alambre inductor están en derivación sobre las dos escobas. Para no derivar la mayor parte de la corriente, el hilo inductor debe ser largo y delgado. Se calcula la resistencia de esta derivación de modo que absorba de 1 a 2 por 100 de la potencia total de la máquina.

En el caso de la excitación en serie, la máquina no se ceba sino cuando se unen sus bornes a un conductor, pues, de lo contrario, el alambre del inductor y del inducido formarían un circuito abierto; pero aquí no ocurre lo mismo, porque los dos alambres en derivación forman siempre en circuito cerrado.

Sin embargo, si la resistencia exterior disminuye más allá de cierto límite, la máquina puede descargarse, pues la corriente derivada no es ya bastante intensa para mantener el estado magnético del inductor. Si la resistencia del circuito exterior aumenta, la corriente crece; lo mismo pasa con la fuerza electromotriz inducida. Es lo inverso de lo que ocurre en el caso de la excitación en serie.

3º *Dinamos compound.* — En estas dinamos se emplean simultáneamente para el inductor los dos modos de arrollamiento precedentes, uno de alambre grueso, en serie, y otro de alambre fino, en derivación sobre las escobas. Así se obtiene en éstas una diferencia de potenciales que es constante e independiente del circuito exterior (fig. 842). La dinamo representada en la figura ofrece este género de excitación.

853. *Dinamos multipolares de corriente continua.* — En la máquina de Gramme y en las que de ella se derivan directamente no hay más que dos polos inductores. En las máquinas de gran potencia modernas de corriente continua se multiplica el número de los polos para aumentar el flujo inductor, de modo que se forme una especie de batería de máquinas bipolares. Para abreviar vamos a suponer que la máquina no tiene más que cuatro polos inductores (fig. 843) colocados simétricamente con respecto a un anillo de Gramme en que sólo figuraremos ocho carretes. Los polos inductores están ligados por núcleos de hierro colocados dentro de una corona A de fundición.

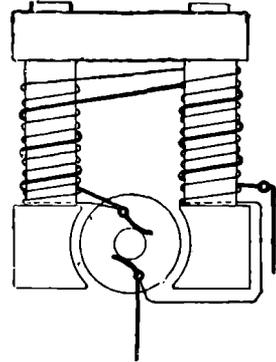


Fig. 842.

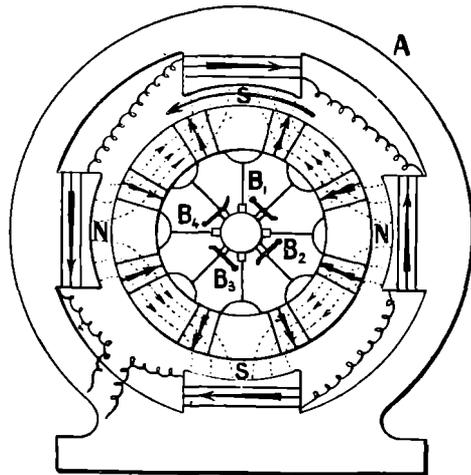


Fig. 843.

Los polos deben ser alternos. Las líneas de fuerza del campo atraviesan el anillo como se ve en la figura. Un razonamiento análogo al que hemos hecho sobre la máquina de Gramme ordinaria, prueba que, si una espira de alambre se mueve en el sentido de la

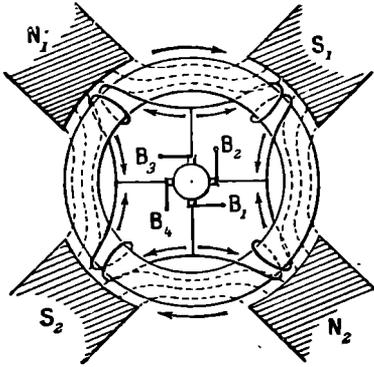


Fig. 844.

flecha, la fuerza electromotriz de inducción cambia de sentido en los carretes, cada vez que éstos atraviesan los planos equidistantes de dos polos contrarios. Sobre el colector dispuesto como el de una máquina de dos polos, frotan cuatro escobas. Se reúnen las escobas B_1, B_3 , por una parte, B_2, B_4 , por otra (fig. 844), B_3 y B_1 constituirán entonces los dos polos de la máquina y se las podrá poner en comunicación con un circuito exterior.

Las flechas que indican el sentido de la corriente, muestran, en efecto, que las fuerzas electromotrices inducidas tienden a hacer salir la corriente a la vez por B_3 y B_1 , y a hacerla entrar al mismo tiempo por B_2 y B_4 , lo cual justifica las conexiones establecidas.

Si la máquina tuviera mayor número de polos, este número debería ser par evidentemente: también sería preciso igual número de escobas. Numerémoslas 1, 2, 3, 4, 5, 6... $2n$, cuyo conjunto formaría un polo de la máquina. Del mismo se reunirían las escobas 2, 4, 6... $2n$ cuyo conjunto formaría el otro polo.

OBSERVACIONES. — 1ª En este caso, ocurre lo mismo que en una máquina de dos polos; y como el cambio de sentido de la fuerza electromotriz en cada espira no se verifica exactamente en los planos de simetría, por eso deben separarse las escobas cierto ángulo. En cuanto a los inductores, siempre son electroimanes. Su excitación se puede hacer en serie, en derivación, en compound, como ya hemos visto en las máquinas de dos polos.

2ª Se pueden suprimir $2n$ escobas, que producen un frotamiento notable. Como la máquina posee n arrollamientos análogos a los de una máquina bipolar, se reúnen en

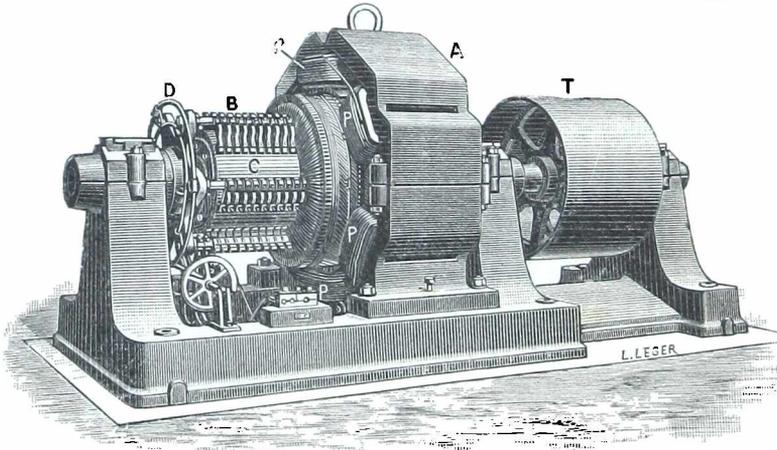


Fig. 845.

batería, en el inducido mismo, las secciones colocadas de igual modo en el campo. De aquí resulta que en este caso bastan dos escobas calzadas en un ángulo de $\frac{\pi}{n}$.

3ª *Dinamos multipolares-serie.* — También se asocian en serie los arrollamientos de la dinamo multipolar. En este caso se necesitan $2n$ escobas, y así se aumenta la fuerza electromotriz de la máquina.

Tipo del Creusot. — Esta máquina (fig. 845)* se compone esencialmente de una corona magnética A que reúne los 6 polos inductores, P, P, P... Entre estos polos gira el inducido, compuesto de un núcleo de planchas dobladas apiladas y aisladas unas de otras con papel para evitar que se produzcan corrientes de Foucault. Los conductores que producen la corriente son barras de cobre rojo embutidas sólidamente en ranuras hechas en la periferia del inducido. Estas barras están reunidas con el colector C compuesto de láminas de cobre batido, aisladas entre sí con mica. Sobre dicho colector frotan las esco-

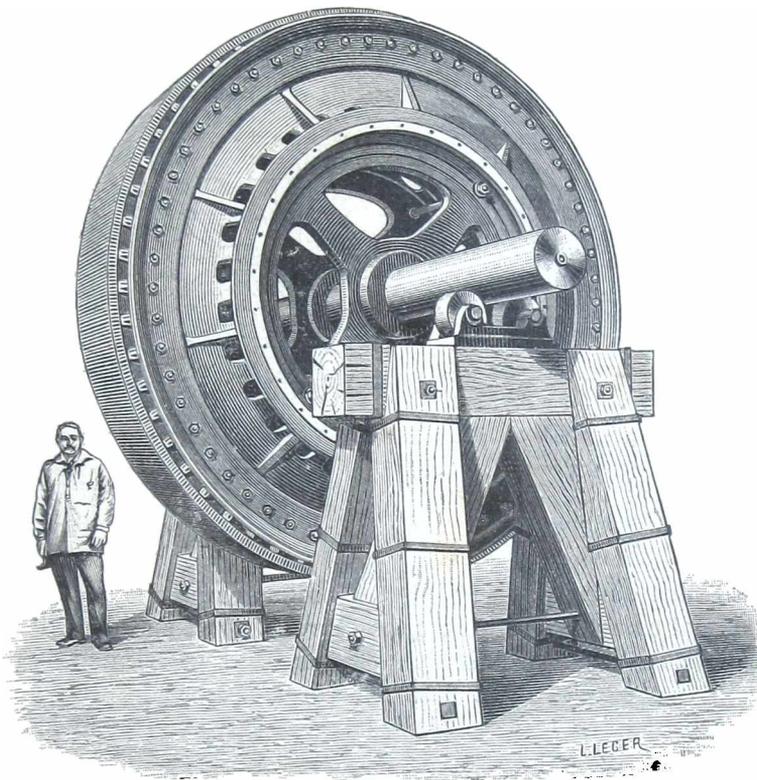


Fig. 846.

billas de carbón B, B, B, reunidas de dos en dos por los conductores D, T es la polea que transmite la energía del motor a la dinamo.

La figura 846 representa aparte el anillo de una máquina multipolar de grandes dimensiones, estudiada y construida en la fábrica del Creusot bajo la dirección de M. Q. Helmer, director de las fábricas eléctricas de Schneider y C^{ia} en Champaña de Sena (Francia)**.

Los polos inductores son 20. Girando a su velocidad normal de 70 vueltas por minuto, posee una fuerza electromotriz de 606 voltios. La corriente que suministra es normalmente de 2,500 amperios, y aun puede llegar a 3,350 amperios sin calentarse demasiado. La potencia de la máquina de vapor que mueve esta dinamo, es de 2 500 a 3 000 caballos.

854. Motores de corriente continua. — Transporte de la energía. — Las magnetos y dinamos que acabamos de estudiar son reversibles, es decir, que lo mismo pueden transformar energía mecánica en energía eléctrica, que producir la transformación inversa.

* Con escala muy reducida.

** Esta máquina es la que alimenta los motores del ferrocarril metropolitano de Paris. Cuando se instaló (1900), era la dinamo de corriente continua más potente de Europa.

En efecto, pongamos las escobillas de una de estas máquinas en comunicación con los polos de un generador cualquiera de corriente eléctrica, por ejemplo, una pila P (fig. 847). Por los carretes del anillo pasará una corriente que se divide en dos derivaciones y los carretes quedan sometidos a fuerzas que harán girar el anillo en el sentido de la

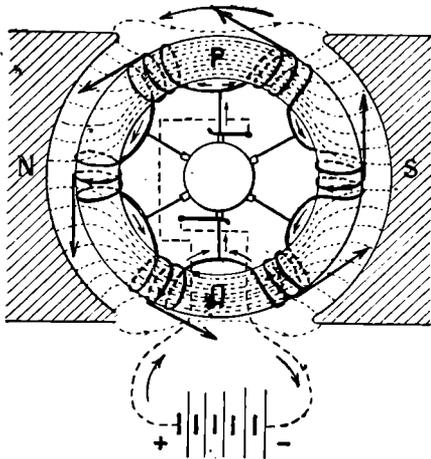


Fig. 847.

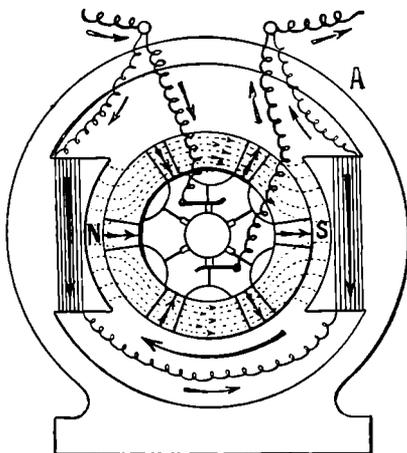


Fig. 848.

flecha. A causa de esta rotación, las escobillas van a apoyar contra otras dos teclas del colector; porque, a los carretes *abcd*, suceden otros, colocados exactamente en las mismas posiciones. El movimiento continúa todo el tiempo que se haga pasar la corriente: podrá transmitirse al exterior, a diversas máquinas, según la clase de trabajo que deba ejecutar el motor.

Como en las máquinas generatrices, los carretes del electroimán pueden armarse en serie, en derivación o en compound. La figura 848 representa esquemáticamente un motor bipolar en derivación. Según la disposición que ahora se da a todos los motores eléctricos, los polos inductores están dentro de una corona de fundición A que cubre todo el motor.

Rendimiento de los motores eléctricos. — La corriente que alimenta el motor le proporciona cierta potencia W , que es el producto Vi de la intensidad i de la corriente por el descenso del potencial V , en los bornes del motor. La potencia mecánica W' que el motor comunica al exterior es siempre más pequeña que W , a causa de las pérdidas de energía debidas al desprendimiento de calor en el circuito del motor, a la histéresis, a las corrientes de Foucault y a los frotamientos. La relación $\frac{W'}{W}$ se llama *rendimiento* del motor.

Lo mismo que en las máquinas, el rendimiento puede llegar al 35 por 100.

Transporte de la energía por las corrientes continuas. — Las máquinas

de corriente continua se prestan al transporte a distancia de la energía proporcionada por un motor cualquiera, máquina de vapor o máquina hidráulica. Basta hacer mover, mediante este motor, una primera dinamo, llamada *generatriz*; la corriente por ella engendrada, se transmite por conductores a la otra estación y pone en movimiento a una segunda dinamo, llamada *receptora*, la cual funciona como motor y restituye la energía del primero.

Pero, para que tal transporte resulte económico, no conviene que haya una pérdida demasiado grande de energía en forma de calor, en los alambres. Ya hemos visto que esto no puede conseguirse sino aumentando la *tensión* de la corriente.

Cálculo del rendimiento. — Supongamos un caso sencillo en que la corriente de la generatriz es recibida en la estación receptora por un solo motor. Sean W_m la potencia del motor mecánico que mueve la generatriz; V , la diferencia de potencial en los bornes de ésta; α , su rendimiento, e i la corriente que produce. Según la definición de rendimiento, tenemos :

$$Vi = \alpha W_m.$$

Sea r la resistencia de los conductores que unen el motor a la generatriz; en estos alambres, se pierde, en forma de calor, una potencia ri^2 vatios.

Si V' es la diferencia de potenciales entre los bornes del motor, la potencia eléctrica $V'i$ es igual, sea cual fuere, a la potencia Vi que proporciona la generatriz, menos ri^2 . Luego :

$$V'i = Vi - ri^2 = \alpha W_m - ri^2.$$

Finalmente, si α' es el rendimiento del motor, el trabajo W' que proporciona al exterior es

$$W' = \alpha' V'i = \alpha' (\alpha W_m - ri^2).$$

El rendimiento del transporte de energía es $\frac{W'}{W_m}$. Se ve que es tanto mayor cuanto menor es ri^2 . Por razones de economía se puede reducir i ; pero, para transmitir una potencia W dada, habrá que aumentar al mismo tiempo V .

Ejemplo de cálculo de una línea de transporte de energía por corriente continua. — Supongamos que se haya de transportar a una distancia l una potencia W tolerando una pérdida de 5 por 100. Sean V la diferencia de potenciales en los bornes de la generatriz, r la resistencia de la línea, s su sección, i la intensidad de la corriente. Se debe de tener :

$$ri^2 = \frac{5}{100} W.$$

Pero

$$i = \frac{W}{V}, \quad \text{de donde} \quad ri^2 = r \frac{W^2}{V^2},$$

por consiguiente

$$r \frac{W^2}{V^2} = \frac{5}{100} W, \quad \text{de donde} \quad r = \frac{5V^2}{100W}.$$

Como

$$r = \rho \cdot \frac{2l}{s}, \quad \text{se deduce} \quad s = \frac{100 \times 2l \rho W}{5V^2}.$$

Si la distancia $l = 10$ km (o 1000000 cm), la potencia a transportar 100 kilovatios ($W = 100\,000$), la resistividad del alambre de línea $\rho = 0,0000016$, se tiene, para $V = 100$ voltios, $s = 640$ cm², sección inaceptable, considerando el precio del cobre. Por el contrario, para $V = 10\,000$ voltios, se tiene una sección 10000 veces más pequeña, sea 0,064 cm², 06,4 mm². que no conduce a un gasto exagerado.

CAPÍTULO XIII

CORRIENTES ALTERNAS

855. **Producción de las corrientes alternas. Alternadores.** — Los fenómenos de inducción permiten obtener naturalmente, en un circuito, corrientes que circulan alternativamente en un sentido o en sentido contrario. Estas corrientes se denominan *alternas* y las máquinas que las producen se llaman *dinamos de corrientes alternas* o *alternadores*.

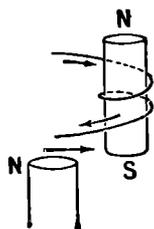


Fig. 849.

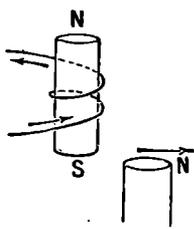


Fig. 850.

Los primeros alternadores fueron construidos por Gramme; pero los usados actualmente sólo tienen analogías remotas con aquéllos. Los alternadores actuales se fundan en el principio siguiente.

Consideremos un polo de un imán (un polo norte N. por ejemplo)

Consideremos un polo de un imán (un polo norte N. por ejemplo)

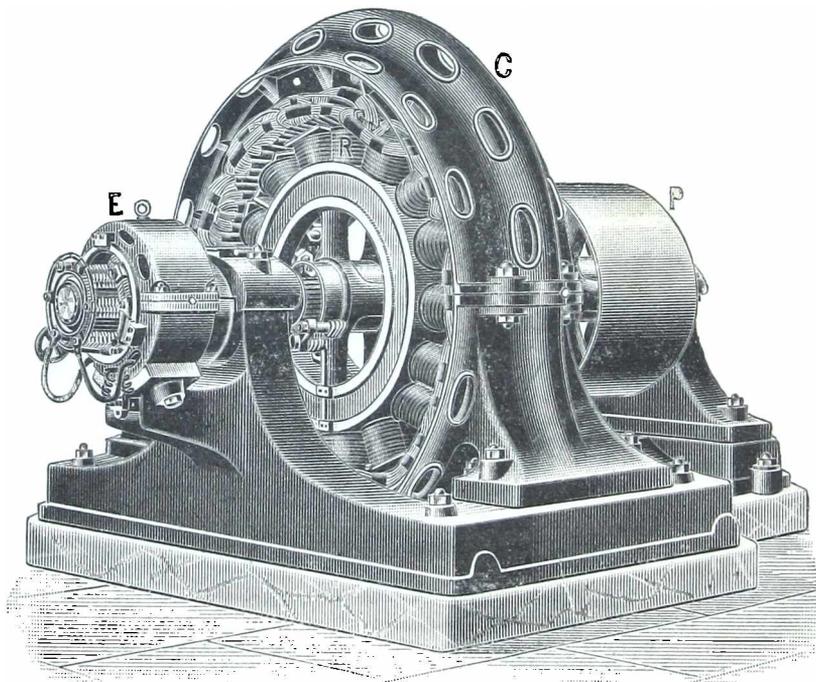


Fig. 851.

que se mueva delante de un carrete provisto de un núcleo de hierro (fig. 849).

Mientras el polo N se acerque, el flujo magnético, dirigido desde el

polo hacia el carrete, aumenta : se producirá, pues, una fuerza electromotriz de inducción en este carrete, que seguirá el sentido de las flechas. Por el contrario, si se aleja N (fig. 850), después de pasar por delante del carrete, como disminuye el flujo, la fuerza electromotriz de inducción estará en sentido contrario al anterior. La fuerza electromotriz inducida al carrete cambiará, por tanto, de sentido, en el momento en que el polo N pase delante de él. Del mismo modo se vería que si se acerca un polo sur del carrete, el efecto de inducción es el mismo que si se aleja un polo norte. Recíprocamente, si se aleja un polo sur, el efecto producido es el mismo que si se acerca un polo norte.

Generalmente, el inducido de los alternadores está fijo. Se compone (fig. 851) * de carretes enrollados en dientes de hierro. Estos dientes

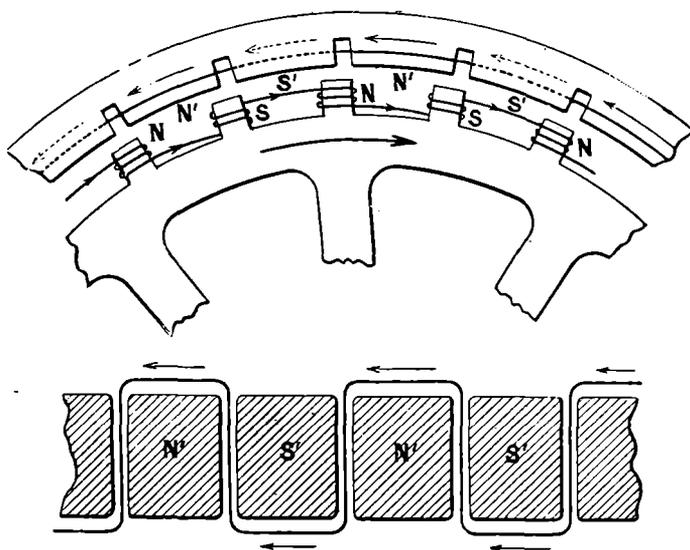


Fig. 852.

están encajados en una corona anular de hierro fundido C: delante de ellos, gira el inductor R que está formado por carretes enrollados en dientes de hierro, que sobresalen de una rueda a la que hace girar un motor por medio de la polea P.

En los carretes del inductor móvil pasa una corriente continua. Los enrollamientos de los carretes están alternativamente en un sentido y en el contrario, de manera que los polos creados en los extremos de los dientes del inductor sean alternativamente norte y sur (fig. 852). Del mismo modo los carretes del inducido están alternativamente arrollados en sentido contrario. Para esto, se hallan constituidos por un mismo alambre enrollado en zig-zag. La figura 852 representa esquemáticamente una porción del inducido tal como se la vería

* El alternador representado (fig. 851) es, en realidad, un alternador *trifaseado* (866;) pero la forma general es la misma que la de un alternador de corriente alterna simple, como el que tenemos delante.

desde el centro del sistema. Los carretes inducidos se encuentran en igual número que los polos inductores.

En todo momento, un polo norte se acerca a un carrete cualquiera N' del inducido, y un polo sur se aleja de él, o inversamente : esto produce efectos que se suman. Las fuerzas electromotrices son de sentido contrario, en los carretes sucesivos ; pero, en virtud del arrollamiento, todas se suman a cada instante. Finalmente, cada vez que los dientes del inductor pasan frente al centro de los dientes del inducido, la fuerza electromotriz de inducción cambia de sentido al mismo tiempo en todos los carretes.

Los dos extremos del alambre del inducido llegan a dos bornes exteriores que son los polos del alternador. Si se reúnen estos polos por un conductor, pasa por ellos una corriente alterna. Si se los deja aislados, prodúcese entre ellos una diferencia de potenciales que es alternativa.

OBSERVACIONES. — 1^o Como se ve, y en contra de lo que sucedía en las máquinas de corriente continua que hemos descrito, el inducido permanece fijo y el inductor es móvil. Se hubiera podido tomar la disposición inversa, es decir, hacer móvil al inducido y fijo al inductor. Para recoger la corriente inducida sería preciso llegar con los extremos del alambre inducido a dos anillos aislados en el árbol y que comunicasen, mediante escobillas, con el circuito exterior *. Pero, generalmente, los alternadores tienen fuerzas electromotrices elevadas, y este mecanismo sería más peligroso que el del inducido fijo, porque, en este último, los extremos del alambre llegan a carretes fijos y pueden aislarse fácilmente y sustraerse al contacto de personas imprudentes.

2^o La corriente continua necesaria para la excitación de los inductores la suministra, generalmente, una dinamo de corriente continua, llamada *excitadora*, que, muy frecuentemente, está montada en el mismo árbol que el inductor. Se la ve en E (fig. 851). A menudo, en las estaciones generadoras potentes, se prefiere excitar un grupo de alternadores por una máquina especial gobernada por un motor independiente. De todos modos, la corriente continua es conducida a los carretes inductores por medio de dos frotadores y de dos anillos incrustados en el árbol.

3^o La parte fija, que es el inducido, se llama, con frecuencia, *estator*, por oposición a *rotor* que es el inductor, movable.

4^o Con objeto de dar gran frecuencia y elevada tensión a la corriente, se ha llegado a construir alternadores de grandes dimensiones (varios metros de diámetro). Esto permite, en efecto, multiplicar el número de polos y obtener grandes velocidades lineales de estos polos ante los carretes inducidos, sin necesitar gran velocidad de rotación.

De todos modos, en los grupos electrógenos recientes, que están movidos por turbinas de vapor (354), como estos últimos motores giran muy rápidamente, se han reducido mucho las dimensiones de los alternadores.

Enderezamiento de las corrientes. — Conmutadores. — También se puede dirigir las corrientes al circuito exterior siempre en el mismo sentido. Basta proveer a la máquina de un aparato especial llamado *conmutador*. De este modo, las corrientes atraviesan el circuito exterior en el mismo sentido ; pero con una intensidad que varía continuamente. Las máquinas que tienen este sistema conmutador se denominan de *corrientes enderezadas*.

Definiciones. — En una corriente alterna, llámase *período* el intervalo de tiempo que separa dos pasos de la intensidad al mismo valor (cuando

*. Semejante aparato está representado en la figura 853.

varía en el mismo sentido); *frecuencia*, el número de periodos por segundo; *alternancia*, cada cambio de sentido de la corriente. Según esto, el número de alternancias es doble de la frecuencia.

856. Magnetos de corrientes alternas.

— En las diversas aplicaciones de la corriente eléctrica (para encender los motores de explosión (356), en las llamadas de los teléfonos (1040), etc.), se emplean pequeñas máquinas de corrientes alternas en que el campo magnético es producido por un imán permanente: a esto se llama máquinas *magneto-eléctricas* o, simplemente, *magnetos*. El principio de estas máquinas fué indicado, en 1854, por Siemens y Halske.

En ellas, el campo magnético está creado por un imán de herradura NS (fig. 853), provisto de piezas polares, entre las cuales da vueltas un carrete B, formado por un núcleo de hierro dulce en el que se arrolla el alambre *paralelamente al eje*. Supongamos que los extremos del alambre de este carrete lleguen a dos anillos *b*, *b'*, aislados en el árbol, y sobre los cuales apoyen dos escobillas que comuniquen con un circuito exterior *cc'*. Si se comunica al carrete un movimiento de rotación, variará periódicamente, sin cesar, el flujo a través de este carrete; será máximo, cuando los planos de las espiras sean perpendiculares a las líneas de fuerza del campo, y nulo cuando sean paralelas a ellas. De ahí resultará en el carrete una fuerza electromotriz alterna y, en el circuito *c*, *c'*, una corriente alterna.

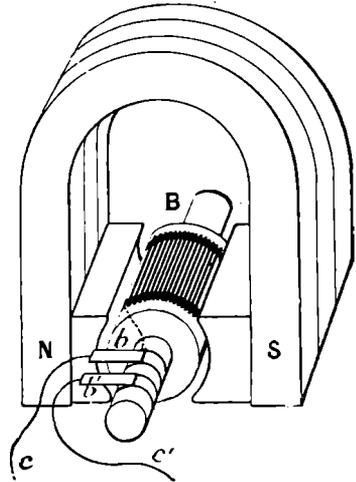


Fig. 853.

Conmutador. — También se puede enderezar la corriente en el circuito exterior. Para conseguirlo, basta constituir el colector por dos semicilindros *c*, *c'* (fig. 854) aislados uno de otro en el árbol y sobre los cuales apoyan las escobillas *b* y *b'*, en dos puntos diametralmente opuestos. Las dos secciones del colector deben estar calzadas de tal modo que se inviertan bajo las escobas en el mismo momento en que la fuerza electromotriz cambia de sentido en el inducido, es decir, en el momento en que el flujo es máximo. La figura 854 representa el momento en que acaba de efectuarse este cambio. En ella se ha representado el carrete en forma de una sola espira. Como el flujo, dirigido de izquierda a derecha, es decreciente en ese momento, en el carrete, resulta que la corriente tiene el sentido indicado por las flechas. Cuando, después de poco menos de media vuelta, la espira vuelva a ser otra vez perpendicular al campo, la corriente cambiará de sentido en esta espira; pero, como las secciones en que apoyan las escobillas se han invertido, el sentido de la corriente no cambia en el circuito exterior.

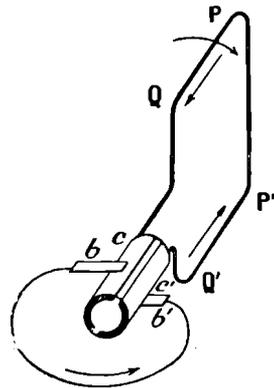


Fig. 854.

857. Estudio de la corriente alterna producida por un alternador.

— **Oscilógrafos.** — 1º *Acción de una corriente alterna sobre un galvanó-*

metro. — Cuando la corriente de un alternador pasa a un galvanómetro o a un amperímetro ordinario, de imán o de corriente móvil, no ocasiona ninguna desviación en el aparato. Esto se debe a que la parte móvil del aparato se halla sometida a fuerzas que cambian de sentido gran número de veces mientras dura su período propio.

Pero, si la parte móvil del galvanómetro tiene un período propio de oscilaciones muy pequeño, y si estas oscilaciones están muy amortiguadas, el aparato puede seguir todas las variaciones de la corriente alterna. Estas condiciones se cumplen en el oscilógrafo de Blondel cuyo principio vamos a exponer.

2º *Oscilógrafo de Blondel.* — Una delgada lámina metálica APB (fig. 855) fija en A y B y estirada por una pequeña polea P, en tensión merced a un resorte r , se halla colocada entre los polos de un imán potente o de un electroimán y sumergida en un aceite

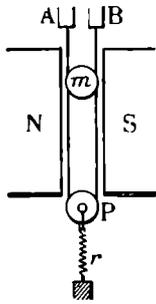


Fig. 855.

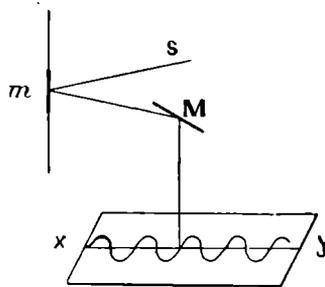


Fig. 856.

quo amortigua mucho las oscilaciones. Pásase por la lámina una derivación de corriente. El sistema constituye un galvanómetro de corriente móvil y la lámina se tuerce alternativamente en un sentido y en el contrario, según el sentido de la corriente alterna. Un pequeñísimo espejo m se halla fijo en la parte móvil, sobre el cual incide un haz de rayos luminosos, que, reflejándose luego en otro espejo M (fig. 856) forman una imagen puntual en una

placa de cristal sin pulimentar, o bien en una placa fotográfica XY.

Pero, en tanto que el espejo m gira, por efecto de la corriente alterna, alrededor de un eje vertical, se hace girar a M alrededor de un eje horizontal. Por consiguiente, si por el aparato no pasa ninguna corriente, como el espejo M da vueltas, la imagen describe en la placa una recta XY. Si se hace pasar la corriente, el espejo m girará a su vez, alternativamente en un sentido y en el sentido contrario, y la imagen describirá una línea sinuosa, cuyas ordenadas, contadas a partir de XY, son proporcionales a la intensidad de la corriente a cada instante.

Si la placa es de cristal sin pulimentar, un observador podrá ver toda la curva entera, gracias a la persistencia de las impresiones en la retina.

Si es una placa fotográfica, bastará revelarla en seguida, para obtener la inscripción gráfica de la intensidad de la corriente.

Entre los aparatos similares destinados al estudio de las corrientes alternas, citaremos el *oscilógrafo* Duddell, el *ondógrafo* de Hospitalier y el *reógrafo* de Abraham y Carpentier.

858. **Gráfico de una corriente alterna.**

— **Armónicos.** — La curva inscrita por el oscilógrafo se acerca siempre a un senoide, tal como la curva de la figura 857*. En realidad, la curva nunca es tan sencilla. En la corriente de un

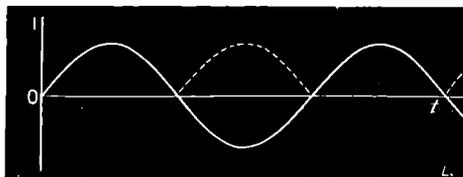


Fig. 857.

alternador, se superpone a la corriente que tiene el período fundamental T, de las corrientes llamadas *armónicas*, por analogía con los fenómenos acústicos y cuyos períodos son partes alicuotas del período fundamental. De todos modos, como estos armónicos son de poca intensidad, podremos, por una primera aproximación, representar la

* Las partes de curva representadas en línea de puntos representan una corriente enderezada.

variación de la intensidad de una corriente alterna, en función del tiempo, por la ecuación

$$i = i_0 \text{ seno } 2\pi \frac{t}{T},$$

en la que i_0 es el valor máximo de la intensidad y T , el período.

OBSERVACIÓN. — En ciertos casos, la presencia de armónicos presenta graves inconvenientes a causa de los fenómenos accidentales de *resonancia eléctrica*, que producen, en ciertos puntos del circuito, *sobretensiones* peligrosas. Se ha conseguido atenuarlos dando una forma redonda conveniente a los polos del rotor, haciendo así que el gráfico de la corriente sea semejante a una senoide perfecta.

859. Intensidad eficaz. — Voltaje eficaz. — Llámase *intensidad eficaz* de una corriente alterna a la intensidad que tendría una corriente continua que, en la duración de un período o de un número entero de períodos de la corriente alterna, desprendiese, en el mismo conductor, igual cantidad de calor.

Esta definición procede de la aplicación de la corriente alterna al alumbrado. En efecto, la intensidad eficaz de una corriente alterna se mide por la intensidad de una corriente continua que produjera el mismo alumbrado, en lámparas de incandescencia por ejemplo.

Se ha demostrado que la intensidad eficaz I_e está dada por la fórmula

$$[1] \quad I_e = \frac{i_0}{\sqrt{2}}.$$

Medida de la intensidad eficaz. — La intensidad eficaz puede medirse, ora por medio de un electrodinómetro (816); ora por medio de un amperímetro térmico (817). Según el modo de estar graduados estos aparatos por medio de una corriente continua, su indicación da la intensidad eficaz de la corriente alterna.

Voltaje eficaz. — En general, en una distribución de energía eléctrica por corriente alterna, llegan a cada instalación, dos cables A y B (fig. 769) entre los cuales los alternadores de la estación generatriz sostienen una diferencia de potenciales alterna V . V puede expresarse, en función del tiempo, por la ecuación

$$V = V_0 \text{ seno } 2\pi \frac{t}{T},$$

siendo V_0 el valor máximo a que llega la diferencia de potenciales durante su variación. Si se unen los puntos A y B por un circuito, veremos que, a igualdad de resistencia, la intensidad de la corriente no es la misma, según que el circuito posea o no una *self-inducción* apreciable.

Llámase *diferencia de potenciales eficaz* o también *voltaje eficaz*, la diferencia de potenciales constante V_e que habría que crear entre A y B, para producir, en todo circuito sin *self-inducción* intercalado entre A y B, una corriente continua cuya intensidad sea igual a la intensidad eficaz de la corriente alterna, creada en el mismo circuito por la diferencia de potenciales alterna.

El voltaje eficaz se mide cómodamente por medio de un voltímetro térmico* (818).

860. Ley de Ohm aplicada a las corrientes alternas. — Supongamos que entre A y B (fig. 769) se introduce un circuito sin *self-inducción* y que no comprenda ninguna fuerza electromotriz ni contraelectromotriz**. Sea r ohmios la resistencia de este circuito. Según la definición de voltaje y de intensidad eficaces, tenemos :

$$[2] \quad I_e = \frac{V_e}{r}.$$

Es decir, que la ley de Ohm se aplica, en estas condiciones, a la corriente alterna. En cualquier momento, tenemos

$$ri = V, \quad \text{o} \quad i = \frac{V}{r};$$

* Es preciso que los carretes de resistencia, intercalados en el voltímetro, no tengan *self-inducción*. Para esto se construyen con un alambre replegado y luego enrollado. Ejemplos de este enrollamiento ofrecen las figuras 758 y 780. Es fácil ver que los efectos de la *self-inducción* en las dos mitades del alambre se anulan mutuamente. En este caso, la resistencia se llama *no inductiva*. Del mismo modo se construyen los carretes de las cajas de resistencias.

** Este caso es prácticamente muy importante. En efecto, es, poco más o menos, el del alumbrado por corriente alterna.

de donde,

$$i = \frac{V_0}{r} \text{ seno } 2\pi \frac{t}{T}; \quad \text{por tanto} \quad i_0 = \frac{V_0}{r} \quad \text{y} \quad I_e = \frac{V_0}{r\sqrt{2}}.$$

Comparando con la ecuación [2] se ve que

$$[3] \quad V_e = \frac{V_0}{\sqrt{2}}.$$

861. **Potencia consumida en un circuito.** — *Potencia en un momento dado.* — En un momento t , en que el voltaje es V y la intensidad i , la potencia consumida por el circuito es Vi vatios. Esta potencia varía a cada momento.

En un momento t se tiene :

$$V = V_0 \text{ seno } 2\pi \frac{t}{T}, \quad \text{y} \quad i = \frac{V_0}{r} \text{ seno } 2\pi \frac{t}{T}.$$

Si representamos por una senoide (I) (fig. 858) el voltaje alterno; por otra senoide (II), la intensidad de la corriente, estas dos curvas no ofrecen ninguna diferencia de fase. La variación del producto Vi se traduce por una curva (III). Se podría demostrar que la *energía total consumida por el circuito, en un periodo, es igual al área encerrada por dos anillos sucesivos de la curva* *.

Potencia media. — Es el cociente de la *energía* consumida por el circuito, durante un periodo, por la duración de este periodo.

La *energía total consumida* en el circuito, supuesto exento de toda fuerza electromotriz, es $Ie^2 r T$.

La *potencia media* durante un periodo es, pues

$$W_m = \frac{Ie^2 r T}{T} = Ie^2 r.$$

Pero, según la ecuación [2]

$$Ier = V_e.$$

Por consiguiente,

$$[4] \quad W_m = V_e I_e.$$

La *potencia media* se obtiene, pues, *multiplicando la intensidad eficaz por el voltaje eficaz*, es decir, se obtiene por el mismo cálculo que las corrientes continuas.

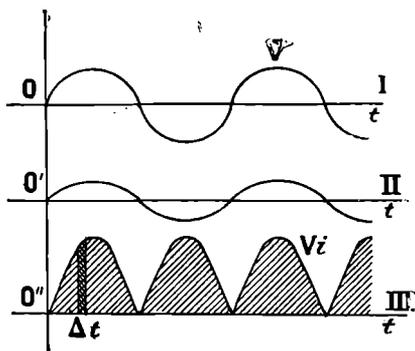


Fig. 858.

Medida de la potencia media. — Para medir la potencia media consumida en un circuito, se puede medir la intensidad eficaz por un amperímetro térmico y el voltaje eficaz por un voltímetro térmico y efectuar el producto de las indicaciones de los dos aparatos.

También se puede emplear un vatiómetro (820). Como las corrientes cambian simultáneamente de sentido en los dos carretes, su acción mutua es siempre de igual sentido; pero varía a cada momento. El aparato adquiere una desviación media que, dado su modo de graduación, mide en vatios la potencia media.

862. **Caso en que el circuito presenta self-inducción.** — En este caso no se pueden aplicar las fórmulas precedentes, que

hacían los cálculos de las corrientes alternas idénticos a los de las continuas.

En efecto, sea V la diferencia de potenciales producida entre A y B (fig. 769) por un

* En efecto, la energía consumida durante el tiempo Δt es $Vi \Delta t$; es el área de un pequeño rectángulo que, siendo Δt infinitamente pequeño, se confunde con el área del trapecio curvilíneo sombreado en la figura. La energía consumida en un intervalo de tiempo dado se mide por la suma de las áreas de semejantes trapecios curvilíneos. En un semiperíodo, esta energía está, por consiguiente, determinada por el área de un anillo de la curva.

alternador, en un momento dado; r la resistencia del circuito; e la fuerza electromotriz de self-inducción, e i , la intensidad de la corriente. Tenemos.

$$V = ri - e \quad (776).$$

Por otra parte, la fuerza electromotriz e es positiva, es decir, del mismo sentido que la corriente, cuando ésta decrece, y negativa, esto es, de sentido contrario a la corriente, si crece ésta. Por lo tanto, si se representa por una sinusoides (III) la intensidad de la corriente (fig. 859), la fuerza electromotriz de inducción estará representada por otra sinusoides* (II).

Por consiguiente, las ordenadas de la curva V que se determinan por la ecuación ($V = V_0 \text{ seno } 2\pi \frac{t}{T}$) pueden obtenerse sumando algebricamente las ordenadas de dos

sinusoides; una, que podemos llamar ($-e$) tiene sus ordenadas iguales y de signos contrarios a las de la curva (II); la otra (ri) tiene sus ordenadas iguales a las de la curva (III), multiplicadas por la resistencia r .

Según esto, se ve que la sinusoides que representa el voltaje V y la que representa la intensidad i de la corriente tienen una diferencia de fase. La intensidad de la corriente retrasa sobre el voltaje. Por ejemplo, la corriente no llega a su máximo de intensidad sino cierto tiempo después que el voltaje ha llegado a su maximum.

Generalmente, se dice que la intensidad presenta un descalzamiento con relación a la fuerza electromotriz.

Además, se ve que la ordenada máxima V_0 del voltaje es mayor que la ordenada máxima ri_0 de la curva (ri).

Luego

$$ri_0 < V_0 \quad \text{o} \quad i_0 < \frac{V_0}{r} \quad \text{y, por consiguiente,} \quad I_e < \frac{V_e}{r}.$$

La intensidad eficaz de la corriente no puede, pues, calcularse por la fórmula de Ohm. Es menor que en el caso de un circuito no inductivo. Desde el punto de vista de la intensidad eficaz, todo ocurre como si el circuito no presentase self-inducción; pero como si tuviera una resistencia R más grande que su verdadera resistencia r y determinada por la ecuación

$$I_e = \frac{V_e}{R}.$$

R se llama *resistencia aparente* del circuito, o también, *impedancia*.

La relación $\frac{r}{R} = K$ se denomina, por una razón que pronto desarrollaremos, *factor de potencia* **. Tenemos

$$I_e = K \frac{V_e}{r}.$$

* Se puede demostrar que estas curvas son verdaderas sinusoides cuando V es a su vez sinusoidal y cuando el medio en que se encuentra el circuito tiene un coeficiente de permeabilidad magnética constante. En este caso se hallaría un circuito desprovisto de núcleo de hierro. Pero, en la práctica, los circuitos presentan carretes con núcleos de hierro y V no es perfectamente sinusoidal, por lo cual, las curvas sólo son aproximadamente sinusoidales.

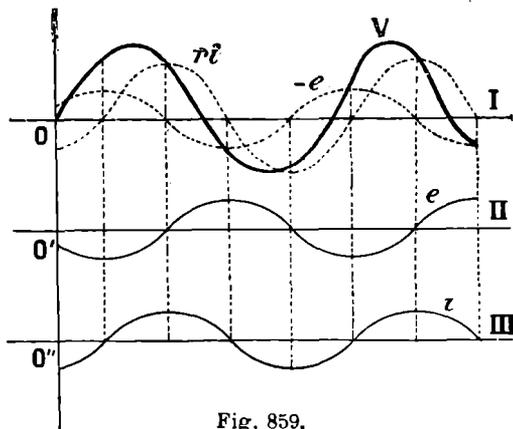
** En caso de que la intensidad de la corriente sea sinusoidal, como V , tenemos

$$V = V_0 \text{ seno } 2\pi \frac{t}{T}$$

y

$$i = i_0 \text{ seno } \left(2\pi \frac{t}{T} - \varphi \right).$$

y se demuestra que $K = \cos \varphi$.



El efecto de la self-inducción ha sido crear un retraso de corriente en el voltaje y, al mismo tiempo, disminuir el valor de la intensidad eficaz.

Repetiendo la figura 859 en diversos casos, se ve fácilmente que este efecto es tanto mayor cuanto más grande es la self-inducción y más pequeña la resistencia r del circuito. Del mismo modo, se ve también que el retraso de la corriente sobre la fuerza electromotriz no puede exceder de un cuarto de período.

Potencia media. — Durante el curso de un período, el voltaje V (representado por la sinusoide I (fig. 860) y la intensidad i (sinusoide II) no siempre tienen el mismo signo. La potencia Vi (curva III) es, pues, tan pronto positiva como negativa; es decir, que el circuito absorbe energía en ciertos momentos, mientras que, en otros, la desarrolla. Para medir la energía total consumida en un tiempo dado, hay que restar de la suma de las áreas de los anillos de la curva (III) situados encima del eje de los tiempos, la de los anillos situados debajo.

Medida de la potencia media. — La potencia media W_m se mide por medio de un vatiómetro. La acción recíproca de los dos circuitos está alternativamente en un sentido y en el contrario; pero predomina uno de los dos efectos, de manera que el aparato adquiere una desviación media.

Expresión de la potencia media. — La energía consumida por el circuito durante un período es $I_e^2 r T$ y la potencia media es siempre

$$W_m = \frac{I_e^2 r T}{T} = I_e^2 r.$$

Pero

$$I_e r = K V_e; \quad \text{luego} \quad W_m = K I_e V_e.$$

Se ve que la potencia media ya no es igual al producto de la intensidad eficaz por el voltaje eficaz; sino igual a este producto multiplicado por un factor K menor que la unidad. Además, se comprende el nombre de factor de potencia, dado a la constante K .

Finalmente, se ve que puede medirse K midiendo, por una parte, I_e y V_e mediante un amperímetro y un voltímetro y, por otra, W_m , por medio de un vatiómetro y,

efectuando el cociente $\frac{W_m}{V_e I_e}$.

Potencia aparente. — El producto $V_e I_e$ recibe el nombre de *potencia aparente* absorbida por el circuito. Se evalúa, no en vatios, sino en voltio-amperios.

Consecuencias del efecto de la self-inducción. — 1ª. Para crear en un circuito inductivo

una corriente alterna de intensidad determinada, hay que disponer de mayor voltaje que para un circuito de igual resistencia, pero no inductivo.

2ª. *Carretes de self.* — El efecto de la self-inducción permite regular la intensidad de una corriente alterna más económicamente que empleando un reóstato. En efecto, un reóstato disminuye a voluntad la intensidad de la corriente; pero transformando en calor inútil gran cantidad de energía. Para variar la intensidad de la corriente alterna en un circuito, basta intercalar en este circuito un carrete en que se puede introducir un núcleo de hierro. Como la introducción de este núcleo aumenta la self-inducción, disminuye la intensidad eficaz; pero, al mismo tiempo, disminuye también la potencia

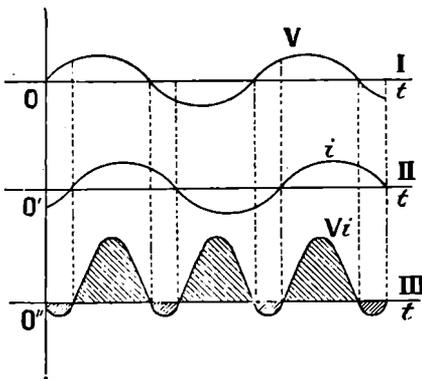


Fig. 860.

consumida por el circuito. Estos carretes se emplean constantemente para la conducción de corrientes alternas: denominanse *carretes de self*.

863. *Efecto de un condensador.* — Si se unen los polos de una precedencia de corriente alterna a las armaduras de un condensador (936), se produce una corriente en el circuito, aunque se hallen aisladas estas armaduras. En efecto, cada armadura se carga alternativamente, para descargarse un momento después, cargarse de nuevo en sentido contrario, y así sucesivamente. Se ha demostrado que la corriente alterna presenta, como en el caso de una self-inducción, una diferencia de fase con el voltaje en los bornes

del productor de corriente. Al mismo tiempo, la intensidad máxima es más pequeña que si los polos estuviesen unidos por un circuito cerrado de igual resistencia r .

Pero, en este caso, *la intensidad de la corriente adelanta sobre el voltaje*. De donde resulta que *se puede compensar el efecto de una self-inducción por un condensador de capacidad conveniente*. Por esta razón, los condensadores se usan mucho en la práctica de las corrientes alternas.

864. **Electrólisis por las corrientes alternas.** — **Válvulas electrolíticas.** — En general, cuando una corriente alterna pasa a un voltámetro, da a los electrodos, la mezcla de los dos iones o de los cuerpos que resultan de las reacciones secundarias. Así, en un voltámetro de agua acidulada se recoge, encima de cada electrodo, una mezcla detonante de oxígeno e hidrógeno*.

Válvulas electrolíticas. — Se ha dado este nombre a aparatos fundados en la electrólisis por una corriente alterna y que no dejan pasar esta corriente sino en un solo sentido. Pueden servir en las aplicaciones de la corriente continua, tales como la carga de los acumuladores y la galvanoplastia (991).

Las válvulas electrolíticas se fundan en el principio siguiente, descubierto por Buff, en 1857 y vuelto a hallar, por Ducretet, en 1875. Si se produce una electrólisis con un electrodo de aluminio y otro de plomo, cuando el primero es ánodo, se cubre inmediatamente de una capa aisladora de aluminio, que se destruye, al instante, cuando la lámina se vuelve cátodo. Por lo tanto, la corriente no puede pasar más que del plomo al aluminio. Además, durante la primera fase, el sistema del electrodo de aluminio y del electrolito, separados por la película aisladora, forma un condensador de capacidad muy grande (a causa de la extremada delgadez de la capa de aluminio). Absorbe la electricidad producida por la primera alternancia, y la devuelve en el momento de la segunda. La válvula de Buff, en la que el electrolito era agua acidulada con ácido sulfúrico, sólo podía servir para una tensión de unos veinte voltios.

Pollak ha demostrado que, tomando por electrolito una solución de fosfato de potasio, se puede emplear la válvula para tensiones de 100 a 200 voltios. De este modo ha hecho prácticas las válvulas electrolíticas. Entre los aparatos análogos al de Pollak merecen citarse los de Nodon y Faria que sólo se diferencian en puntos de detalle.

865. **Corrientes de varias fases.** — Se llama sistema de *corrientes de varias fases (polifaseadas)*, a un sistema de corrientes alternas de mismo periodo, de intensidades máxi-

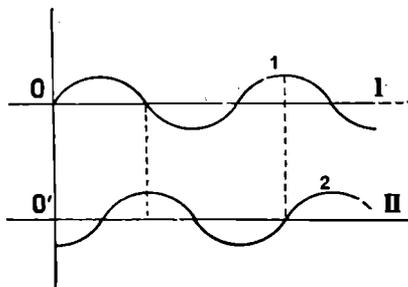


Fig. 861.

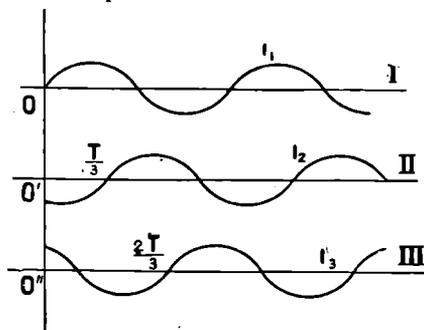


Fig. 862.

mas iguales o casi iguales; pero que presentan entre sí diferencias de fase adecuadas. Las más usadas son las corrientes de *dos fases (bifaseadas)* y las de *tres fases (trifaseadas)*. En las corrientes de dos fases, una de ellas tiene sobre la otra un avance o un retraso de un cuarto de periodo. Están, pues, representadas por dos sinusoides (I) y (II) (fig. 861) y las ecuaciones que representan sus intensidades en función de los tiempos son respectivamente

$$i_1 = i_0 \operatorname{seno} 2\pi \frac{t}{T},$$

* Estos fenómenos fueron estudiados por Maneuvrier y Chappuis (*Comptes rendus*, 18 de Junio de 1888). Han indicado que, en un voltámetro por el que se hace pasar una corriente alterna, la cantidad de oxígeno desprendida es menor que el tercio del volumen total. Además, este volumen total es un poco menor que el volumen teórico, calculado según la cantidad de electricidad que pasa. Esto no tiene nada de extraño, toda vez que los gases han podido volverse a combinar en parte.

$$i_2 = i_0 \operatorname{seno} 2\pi \left(\frac{t - \frac{T}{4}}{T} \right) = -i_0 \operatorname{cos.} 2\pi \frac{t}{T}.$$

En las corrientes de tres fases, la segunda corriente presenta un retraso de un tercio de periodo sobre la primera, y la tercera, un retraso de dos tercios de periodo sobre la primera. Las sinusoides (I), (II) y (III) (fig. 862) representan un sistema de corrientes de tres fases. Sus ecuaciones son :

$$i_1 = i_0 \operatorname{seno} 2\pi \frac{t}{T},$$

$$i_2 = i_0 \operatorname{seno} 2\pi \frac{t - \frac{T}{3}}{T} = i_0 \operatorname{seno} \left(2\pi \frac{t}{T} - \frac{2\pi}{3} \right).$$

$$i_3 = i_0 \operatorname{seno} 2\pi \left(\frac{t - \frac{2T}{3}}{T} \right) = i_0 \operatorname{seno} \left(2\pi \frac{t}{T} - \frac{4\pi}{3} \right).$$

866. Producción de las corrientes de varias fases. — 1º *Corrientes de dos fases.* — Se

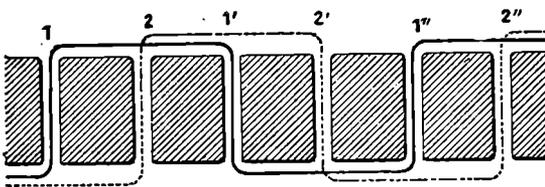


Fig. 863.

producen como las corrientes alternas ordinarias; pero por medio de alternadores que tienen dos enrollamientos distintos. Por cada polo inductor hay dos ranuras en el inducido. El primer circuito está enrollado sobre las ranuras 1, 1', 1' (fig. 863), el segundo lo está en las ranuras 2, 2', 2'. Como la distancia de dos polos de mismo nombre del induc-

tor es igual a la distancia de las dos ranuras 1 y 1', se ve que la fuerza electromotriz que se produce, en un momento dado, en el primer circuito, so producirá un cuarto de periodo después, en el segundo.

2º *Corrientes de tres fases.* — Por cada polo inductor del alternador hay 3 ranuras en

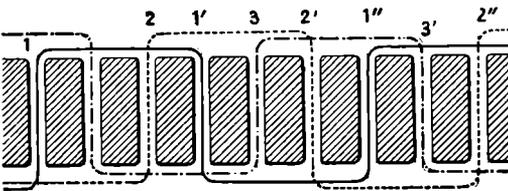


Fig. 864.

el inducido. Mientras que el primer circuito está enrollado en las ranuras 1, 1', 1'... (fig. 864), el segundo lo está en las ranuras 2, 2', 2'... y el tercero, en las 3, 3'... Se ve que la fuerza electromotriz que se produce en un momento dado en el primer circuito, se producirá, un tercio de periodo más tarde, en el segundo circuito y dos tercios de periodo después, en el tercero. El alter-

nador representado en la figura 851 es un alternador de tres fases, de Schneider. Posee 16 polos inductores y gira con una velocidad de 375 vueltas por minuto.

Su potencia aparente es de 400 a 500 kilovoltios-ampieros y su fuerza electromotriz eficaz, de 500 voltios.

867. Transporte de las corrientes de varias fases. — Las corrientes de varias fases exigen más de dos alambres para su transmisión; pero no hace falta emplear dos alambres para cada fase.

1º *Corrientes de dos fases.* — Para las corrientes de dos fases, se unen a la generatriz dos extremos de los circuitos. Estos dos circuitos de la generatriz se hallan representados esquemáticamente en AB, AC (fig. 865). En la estación receptora, so colocan del

* Si la segunda corriente presentase un avance en vez de un retraso, lo que viene a ser lo mismo, se tendría :

$$i_2 = i_0 \operatorname{seno} 2\pi \frac{t + \frac{T}{4}}{T} = i_0 \operatorname{coseno} 2\pi \frac{t}{T}.$$

mismo modo los circuitos receptores, en A'B' A'C'. So unon los tres puntos A, B, C por tres alambres de línea. So pucdo demostrar que el alambre AA' está recorrido por una intensidad eficaz mayor que los alambres BB', CC'; por eso se lo construye con mayor diámetro.

2º *Corrientes de tres fases.* — Para las corrientos de tres fases, úsase generalmente la

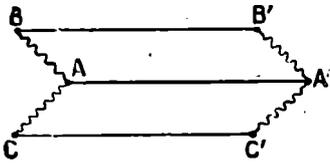


Fig. 865.

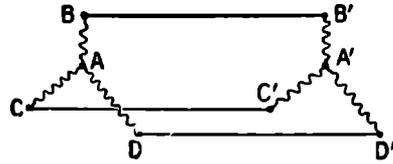


Fig. 866.

armadura en estrella : AB, AC, AD (fig. 866) representan los circuitos en que se producen las corrientes de tres fases, A'B', A'C', A'D' los on que se utilizan. Si so unen A y A' por un alambre, no pasará ninguna corriente.

En efecto, es fácil ver (fig. 862) que, en un momento dado, dos de las corrientes, AB, AC, por ejemplo (fig. 866) son de mismo sentido, es decir, las dos se apartan de A, por ejemplo; y la tercera AD, de sentido contrario a las dos primeras. El cálculo demuestra fácilmente que la suma $i_1 + i_2 + i_3$ es siempre nula. Esto prueba que la intensidad en AD es, en valor absoluto, igual a la suma de las intensidades en AB y AC. En el momento considerado,

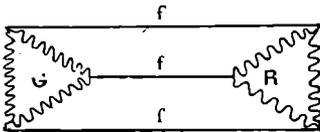


Fig. 867.

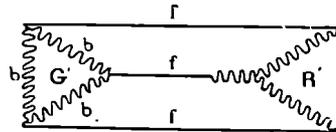


Fig. 868.

puede decirse que el circuito A'D' DA sirvo de alambre de retorno común a los dos primeros. Además, los tres circuitos desempeñan sucesivamente este papel.

También se emplea otro sistema de armadura, llamado en triángulo o en delta (Δ), a causa de su forma (fig. 867). Las tres secciones de la generatriz están en G, y, en R, los tres circuitos receptores. Las comunicaciones f, f, f se establecen entre los vértices de los triángulos.

En ciertos casos, cuando se deben pasar las corrientes de la generatriz por mediación de un transformador (871) se emplea un sistema de armadura mixta, llamado en estrella-

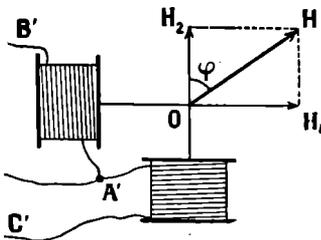


Fig. 869.

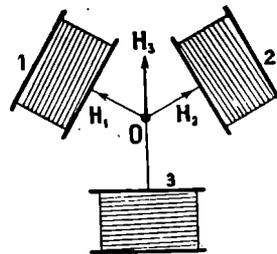


Fig. 870.

triángulo. Las tres secciones de la generatriz están en G' (fig. 868), acopladas en triángulo, y las secciones de la receptora se acoplan en estrella, en R'.

868. **Campos magnéticos giratorios.** — Las corrientes de varias fases se prestan a la producción de los *campos magnéticos giratorios*.

1º *Corrientes de dos fases.* — Supongamos dos corrientes de dos fases, la segunda de las cuales, i_2 , adolante sobre la primera; sus ecuaciones son :

$$i_1 = i_0 \text{ seno } 2\pi \frac{t}{T} \quad \text{y} \quad i_2 = i_0 \text{ cos. } 2\pi \frac{t}{T}.$$

Hagamos circular ambas corrientes por dos carretes idénticos (fig. 869) cuyos ejes son perpendiculares y se encuentran en O. En el momento t , el campo de uno de ellos está representado por un vector H_1 , dirigido según el eje de este carrete y queda determinado por la relación

$$H_1 = H_0 \text{ seno } 2\pi \frac{t}{T},$$

siendo H_0 el campo máximo, producido cuando la corriente tiene la intensidad máxima i_0 . Del mismo modo, el campo H_2 del otro carrete, está dado por la fórmula

$$H_2 = H_0 \text{ cos. } 2\pi \frac{t}{T},$$

suponiendo que el campo máximo tiene la misma intensidad que en el primer carrete.

El campo que resulta en el punto O está representado en dirección y en magnitud por la diagonal del rectángulo construido sobre OH_1 y OH_2 . Su intensidad H es

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2} = H_0.$$

Además, si φ representa el ángulo de la dirección del campo resultante con OH_2 , tenemos

$$\text{tg. } \varphi = \frac{H_1}{H_2} = \text{tg. } 2\pi \frac{t}{T}; \quad \text{de donde} \quad \varphi = \frac{2\pi t}{T}.$$

Se ve que el campo resultante H conserva, en todo momento, un valor constante H_0 y que gira con una velocidad angular constante $\frac{2\pi}{T}$. Luego da una vuelta, en un tiempo igual al período T .

2º *Corrientes de tres fases.* — Del mismo modo se demuestra que tres carretes, cuyos ejes formen entre sí ángulos de 120° (fig. 870) y estén recorridos por corrientes de tres fases, crean un campo giratorio en el punto de intersección común a sus ejes.

El vector que representa el campo da una vuelta completa mientras dura un período. Por otra parte, si H_0 representa la intensidad máxima del campo producido por un carrete, la intensidad del campo giratorio es constante e igual a $\frac{3H_0}{2}$.

869. **Efectos de un campo giratorio.** — 1º *Acción sobre un imán.* — Si, en la región en que se produce un campo magnético giratorio, se coloca un imán móvil alrededor de un eje perpendicular al campo, este imán, que se sitúa siempre en la dirección del campo, gira necesariamente con la misma velocidad angular que el propio campo.

2º *Acción en un circuito cerrado.* — *Inducido de jaula de ardilla.* — Supongamos que en un campo giratorio se coloque un circuito cerrado o un sistema de circuitos cerrados.

Para hacer ver el efecto del campo giratorio sobre estos circuitos, conviene emplear el siguiente sistema, usado en los motores de campo giratorio y conocido con el nombre de *jaula de ardilla*. Compónese de una especie de jaula formada por dos ruedas de cobre unidas por barras del mismo metal (fig. 871). El todo está bañado en hierro dulce, es decir, que las barras están embutidas en agujeros practicados en un núcleo de hierro.

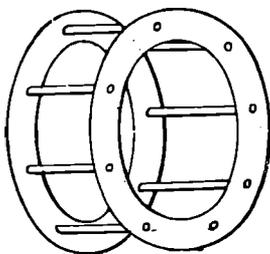


Fig. 871.

Supongamos que el sistema sea móvil alrededor de un eje perpendicular al plano que describe el vector que representa el campo giratorio. A consecuencia de las variaciones de flujo que se producen en los circuitos que forman las barras de la jaula de ardilla, se desarrollan, en estos circuitos, corrientes inducidas y estas corrientes están sometidas a fuerzas ejercidas por el campo. Conforme a la ley de Lenz, estas fuerzas son de sentido contrario al movimiento relativo del campo con relación al circuito. Este se pone en movimiento de rotación en el sentido de la rotación del campo. Fijémonos, también, en que las fuerzas electromagnéticas se anulan cuando el circuito gira con la misma velocidad angular que el campo.

Entonces, en efecto, no varía el flujo en los circuitos y no se producen en ellos corrientes inducidas. Al contrario, las fuerzas electromagnéticas tienen una intensidad máxima cuando el inducido no gira.

870. **Motores de corrientes alternas.** — 1º *Motores sincronos.* — Un alternador de una fase (fig. 852) es una máquina de inversión. En efecto, supongamos que se envía una corriente continua a los electros del rotor; y, a los carretes del estator, una corriente

alterna. En un momento dado, cada diente del rotor se encuentra entre dos dientes del estator, atraído por uno de ellos y rechazado por el otro. Si el rotor no se lanza con avance, no se pondrá en movimiento, porque, un momento después, invirtiéndose el sentido de la corriente en el estator, ocurre lo mismo con las fuerzas que actúan sobre el rotor. Pero, si se lanza con avance el rotor, de manera que el cambio de sentido de la corriente, en el estator, se produzca en el mismo momento en que los polos del rotor pasen frente a los dientes del estator, las fuerzas tienen también el mismo sentido y entretienen un movimiento continuo del rotor. Se ve que semejante motor no puede funcionar sino cuando se lanza con avance y cuando sea *síncrono* con la corriente que se le envía.

Para lanzarlo, hay que empezar por darle, bien a mano, bien por medio de una máquina especial, tal velocidad que se consiga el sincronismo.

Se ve también que todo aumento brusco de resistencia mecánica, que refrene al motor lo hará perder el sincronismo y lo parará.

La excitación de los electros del motor se efectúa, generalmente, por la corriente de una pequeña dinamo de corriente continua, movida por el mismo motor. A menudo, se emplea también una pequeña parte de la corriente de la generatriz, enderezada por un conmutador.

Un alternador de *dos o tres fases* puede también funcionar como motor síncrono, cuando se envían a sus circuitos corrientes también de dos o tres fases. Se ha demostrado que, de este modo, se produce, en la corona inducida, una serie de polos, alternativamente norte y sur, que giran alrededor de este anillo con velocidad angular constante. El rotor, lanzado con la velocidad necesaria, sigue a estos polos en su movimiento.

Se ha demostrado igualmente que los motores síncronos de corrientes de varias fases ofrecen sobre los de una sola fase, la ventaja de poder arrancar por sí solos. Para esto, basta cerrar sobre sí mismo el circuito del rotor. En él se desarrollan corrientes inducidas y las fuerzas electromagnéticas arrastran al rotor en el sentido de la rotación de los polos del estator, hasta que quede realizado el sincronismo. A partir de este momento se puede lanzar la corriente continua al rotor, y el motor producirá el trabajo solicitado.

2º Motores asíncronos. — Se pueden construir motores *asíncronos de corrientes de varias fases, o motores de campo giratorio*, colocando un *inducido de jaula de ardilla* en un campo giratorio. Sabemos que empezará a girar por la influencia de las fuerzas electromagnéticas. En realidad, en los grandes motores, los carretes en que se hacen pasar las corrientes de varias fases están colocados en un estator análogo al de un alternador generador. En el estator se producen *polos giratorios*. En el rotor, se originan corrientes inducidas, y éste se pone en movimiento, en el sentido de la rotación de los polos.

Estas máquinas poseen la preciosa propiedad de tener un par motor más grande en el arranque que en cualquier otro momento de la marcha. Por lo tanto, pueden arrancar por sí mismos, *en carga*, como los motores de corriente continua, lo que no hacen los motores precedentes. Son muy convenientes para la tracción eléctrica.

Las variaciones de velocidad necesarias en esta aplicación, se ejecutan de varias maneras; por resistencias intercaladas en el rotor o en su circuito, pero por fuera de la máquina; por variación del número de polos del estator; por transformador (871) de tomas secundarias múltiples (toda vez que el transformador puede dar así una tensión más o menos grande, según que se utilicen todos sus carretes secundarios, o sólo una parte); por armadura en tándem, estando cerrado el rotor de un primer motor sobre el estator de un segundo, cuyo rotor puede ser cerrado sobre resistencias ajustadas a mano.

3º Motores asíncronos de corriente alterna simple. — También se constituyen *motores asíncronos de corriente de una sola fase* colocando un *inducido de jaula de ardilla* en el centro de un estator recorrido por una corriente alterna simple. Pero estos motores no pueden arrancar por sí solos como los anteriores y necesitan ser lanzados como los motores síncronos.

Hoy se construyen motores asíncronos de una fase que arrancan por sí solos, por medio de un enrollamiento auxiliar, al cual se envía una corriente tomada de la corriente principal (por una self o por una capacidad, por ejemplo), que, agregando su efecto al del enrollamiento principal, produce un campo giratorio.

4º Empleo de un motor de colector. — Si se envía una corriente alterna a un motor de corriente continua, este empieza a dar vueltas. — En efecto, como el sentido de la corriente cambia al mismo tiempo en el estator y en el rotor, el sentido de la acción electromag-

nética continúa lo mismo. Pero, sin modificación, el motor de corriente continua aplicado a la corriente alterna, ofrece graves inconvenientes.

Primeramente, a causa de su gran self-inducción, exige, en igualdad de potencia, un voltaje eficaz mucho mayor que con una corriente continua. Después, las variaciones del flujo a través el estator, determinan corrientes de Foucault. Para evitarlas, hay que laminar el estator lo mismo que el rotor. Ahora se emplean motores de colector en serie, en los que resulta atenuado el efecto de self-inducción sobre el rotor. Se usan también motores de colector llamados de *repulsión*, en los cuales la corriente alterna pasa sólo por los inductores; el inducido está cerrado sobre sí mismo, pero las escobas están a 45 grados de la línea de los polos. Las variaciones de corriente en el inductor determinan una corriente en el inducido. Demuéstrase que en estas condiciones resulta un par motor. Gracias a estos perfeccionamientos, el empleo de los motores de colector ha adquirido gran extensión en estos últimos años. Se los emplea con frecuencia en la tracción eléctrica por corrientes de una fase.

CAPÍTULO XIV

TRANSFORMADORES Y CARRETES DE INDUCCION

871. **Transformadores.** — Los transformadores son aparatos fijos que permiten aumentar o disminuir a voluntad la tensión de una corriente alterna, variando, al mismo tiempo, en sentido inverso, su intensidad. El principio de los transformadores se debe a Gaulard.

Un transformador (fig. 872) se compone de un núcleo anular de

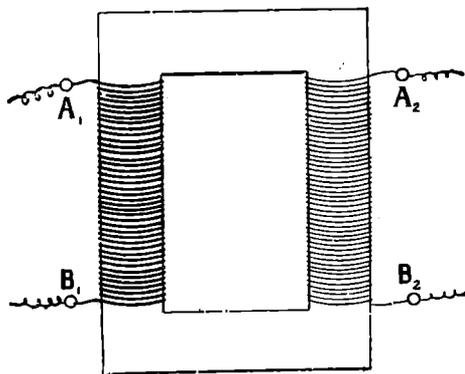


Fig. 872.

hierro dulce (laminado, para evitar las corrientes de Foucault), en el cual se arrollan dos circuitos. El primero es de *alambre grueso* y tiene pocas espiras y está ligado a los bornes A_1B_1 ; el segundo, que termina en los bornes A_2B_2 es de *alambre delgado* y consta de muchas espiras.

Si, por el alambre grueso, llamado, generalmente, *primario*, se pasa una corriente alterna de poca tensión y gran intensidad, ésta produce en el núcleo variaciones periódicas de flujo. De ahí resul-

tan, en el alambre delgado o *secundario*, fuerzas electromotrices *proporcionales al número de espiras de este circuito* y que, en consecuencia, pueden ser tan grandes como se quiera. Al mismo tiempo, la variación del flujo en el primario, produce en él un fuerza contraelectromotriz, también proporcional al número de espiras del primario. De ahí resulta que *las tensiones de la corriente secundaria y de la corriente primaria son proporcionales al número de espiras de estos circuitos.*

Además, la teoría y la experimentación demuestran que la potencia disponible en el secundario es casi igual a la absorbida por el primario.

Luego es indispensable que la corriente secundaria tenga una intensidad eficaz más pequeña que la corriente primaria. El cociente de la potencia de la corriente secundaria por la potencia de la primaria se llama *rendimiento* del transformador. Este rendimiento puede llegar a un 95 por 100.

Recíprocamente, si por el alambre fino se pasa una corriente alterna de alta tensión y poca intensidad, en el alambre grueso se recogerá una corriente de gran intensidad y de poca tensión*.

872. **Transporte de energía por las corrientes alternas.** — Gracias a los transformadores, la corriente alterna permite transportar a gran distancia energía eléctrica.

Para esto, se produce en la estación generatriz, una corriente de alta tensión, bien directamente, por un alternador a propósito, bien por medio de un transformador que eleve la tensión de la corriente producida por la máquina. Esta corriente se transporta por una línea que puede estar formada por conductores de pequeño diámetro, ya que la intensidad de la corriente es débil; no habrá sino una pérdida insignificante de energía, a condición de *aislar perfectamente* la línea. En la estación receptora, se disminuye la tensión de modo que se obtenga una corriente intensa, pero de poca tensión, que pueda utilizarse directamente.

Hoy se emplean tensiones muy elevadas (110 000 voltios en la Exposición de Turín de 1911; 140 000 voltios en América en 1912). Las dificultades principales, con que se ha tropezado se refieren al aislamiento de los aparatos y de la línea. Si las espiras de la corriente secundaria del transformador no estuvieran bien aisladas, las grandes diferencias de potenciales que existen entre estas espiras deternimarían chispas, y entonces el aislador sería agujereado, estropeándose el transformador. Para conseguir un buen aislamiento, se rodean los conductores con trencilla antes del enrollamiento. En seguida se colocan los carretes en el vacío y se echa en la cuba que los contiene aceite mineral *caliente*, que penetra así en todas las cavidades.

Las líneas son aéreas o subterráneas. Las aéreas están sostenidas por postes de madera, por cemento armado o por pilares de hierro, y están aisladas por aisladores de porcelana o de vidrio, análogos a los de las líneas telegráficas, pero más grandes. Los conductores subterráneos están metidos en un tubo de plomo, aislados unos de otros, así como del tubo, por papel impregnado de aceite, como acabamos de ver respecto de los transformadores.

Las líneas aéreas están expuestas a las descargas atmosféricas, que crean sobretensiones peligrosas y producen roturas de aisladores; pero se las preserva con *pararrayos*, de los cuales el más empleado es el *pararrayos de cuernos*, cuyo principio es el siguiente. En el alambre de línea AB (fig. 873) se intercala un carrete S formado de algunas espiras; el principio del carrete está en relación con una lámina metálica en forma de cuerno, cerca de la cual hay otra lámina idéntica en comunicación con la tierra. Una brusca descarga atmosférica no puede traspasar el carrete S, sino que brota en forma de chispa entre los dos cuernos y va a perderse en el suelo. Pero la corriente de la línea podría continuar en forma de arco entre los cuernos; mas esto se ha evitado, porque, bajo la

* *Transformación de las corrientes de varias fases.* — Las corrientes de varias fases se prestan a la transformación lo mismo que las corrientes alternas simples. Pero, para corrientes de dos fases el transformador debe contener dos pares de circuito y tres, para corrientes de tres fases.

influencia de la corriente de aire ascendente que produce, el arco se eleva y llegando a la región donde los cuernos están separados, se apaga por sí solo. Cuando las líneas están sostenidas por pilastras metálicas, es conveniente ponerlas en comunicación con el suelo, y entonces las reúne un conductor independiente de la línea, poniendo en comunicación con el suelo una per cada tres o cuatro. El contacto con el suelo debe ser perfecto (como se hace con todos los pararrayos); si no hay vena de agua subterránea, se deben emplear placas metálicas de 1 metro cuadrado por lo menos, rodeándolas de un volumen de cok humedecido, de 1 metro cúbico lo menos.

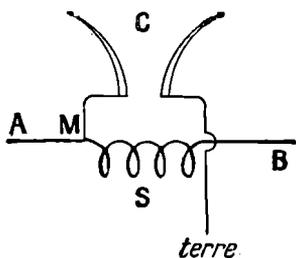


Fig. 873.

Ejemplo de cálculo de una línea de corrientes alternas.

— Supongamos, por ejemplo, que se quiere calcular una línea para corrientes de tres fases, de longitud l cm, suponiendo que se cuenta con una pérdida de 5 por 100 por causa del calor que desprende la línea. Sean en ese caso W la potencia media a transportar, V el voltaje eficaz, i la intensidad eficaz, r la resistencia total de los alambres de línea (la longitud es $3l$), s la sección de los alambres y ϱ su resistividad. Tendremos.

$$ri^2 = \frac{5}{100} \cdot W, \quad \text{con} \quad W = KVi; \quad \text{de donde} \quad r = \frac{5}{100} \cdot \frac{K^2 V^2}{W}$$

Como

$$r = \varrho \cdot \frac{3l}{s},$$

se deduce de aquí

$$s = \frac{100}{5} \times \frac{3l\varrho W}{K^2 V^2}$$

Tomando para K un valor medio 0,72 y para ϱ 1,6. 10^{-6} , suponiendo igual a 100 kilovatios la potencia a transportar ($W = 100\,000$) y a 1 000 voltios el voltaje ($V = 1000$) tendremos, para una distancia de 100 kilómetros ($l = 10\,000\,000 = 10^7$) $s = 185$ cm², enteramente inaceptable. Por el contrario, con un voltaje de 100 000 voltios, se tiene una

sección 10 000 veces más pequeña, sea 0,0185 centímetros cuadrados, o 1,85 milímetros cuadrados, de precio 10 000 veces más bajo.

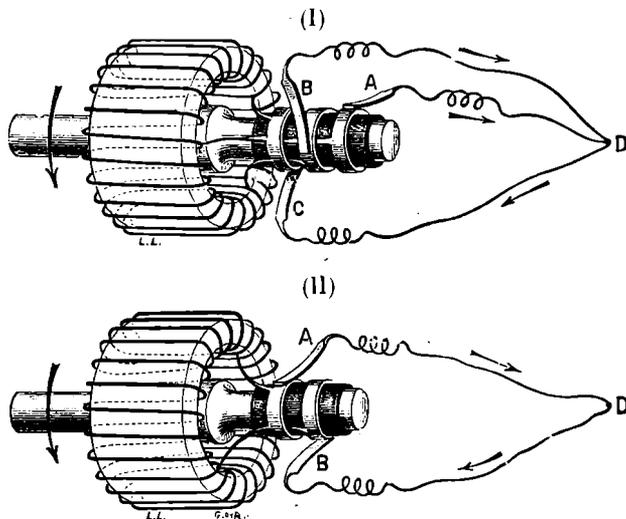


Fig. 874.

873. Transformación de las corrientes continuas en corrientes alternas. — **Conmutadoras.** — Una corriente continua puede ser transformada en corrientes alternas simples o de varias fases, accionando, por la corriente continua, un motor que lleve consigo un alternador.

De este modo, una sola máquina puede cumplir las dos funciones. En efecto, una máquina de Gramme de corriente continua puede proporcionar también corrientes

alternas simples o de varias fases. Para obtener corrientes alternas simples se unen dos puntos diametralmente opuestos del enrollamiento * a dos anillas aisladas, en el árbol (fig. 874, I). Estas anillas, están unidas, por frotadores, a un circuito exterior. Se ve fácil-

* En caso de una máquina bipolar.

mente que en las dos mitades del inducido se producen fuerzas electromotrices alternas, que concurren a dar una corriente alterna simple en el circuito exterior.

También puede recogerse una segunda corriente por anillas que comuniquen con dos puntos del anillo, a 90° de los primeros. Esta segunda corriente forma con la primera un sistema de corrientes de dos fases. Finalmente, si se unen a tres anillas, tres puntos del anillo a 120° uno de otro (fig. 874, II) las tres secciones así determinadas en el anillo forman tres circuitos, asociados en triángulo, en las cuales se desarrollan fuerzas electromotrices de tres fases.

Entonces, el mismo anillo de Gramme se puede proveer de dos colectores, el primero

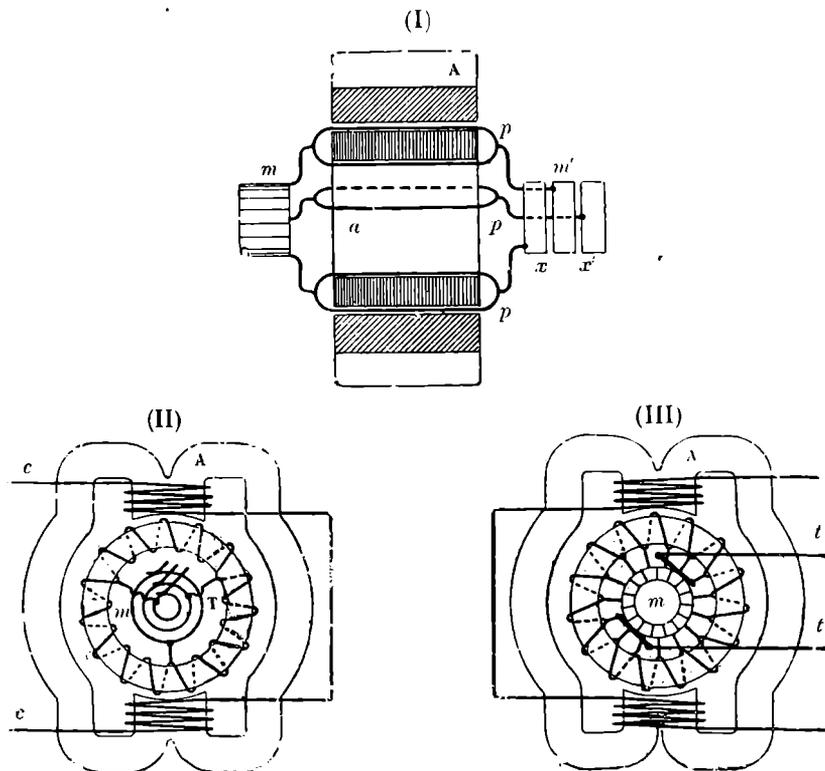


Fig. 875.

m (fig. 875. I) idéntico al de una máquina de corriente continua; el segundo, *m'*, de anillas, como los que acabamos de describir. Por el primer colector trasmítase a la máquina una corriente continua. Al mismo tiempo, se recogen, por las anillas, corrientes alternas.

Semejante máquina se llama *conmutadora*. La figura 875 representa una conmutadora que transforma la corriente continua en corriente de tres fases. En (I), se ve el corte de la máquina; (II) representa esquemáticamente el colector de corrientes de tres fases. Finalmente, (III) es el colector de corriente continua.

874. **Transformación de las corrientes alternas en corrientes continuas.** — La transformación inversa de corrientes alternas en corrientes continuas se efectúa de varias maneras :

1° En primer lugar, puede enderezarse la corriente alterna por medio de un conmutador especial puesto en movimiento por un motor síncrono. El más conocido es el enderezador Auvvert-Ferrand, que da una *corriente undulada*, esto es siempre del mismo sentido, pero de intensidad variable según el período de la corriente alterna. La interposición de un aparato provisto de self-inducción disminuye las variaciones, y la intensidad de la corriente es casi constante.

2° Ya hemos visto que, merced a las válvulas electrolíticas, de cada dos alternancias no pasa más que una.

3° Se acopla un motor de corriente alterna a una máquina de corriente continua.

4° Se emplea una conmutadora como la que hemos descrito, porque ésta puede realizar las dos transformaciones inversas.

Así, la máquina representada (fig. 875) puede recibir corrientes de tres fases, por sus tres anillas. De este modo, constituye a la vez un motor de tres fases síncrono y una generatriz de corriente continua, la cual corriente es recogida por el colector *m*.

CARRETES DE INDUCCIÓN

875. **Carretes de inducción.** — Con el nombre de *carretes de inducción* o *carretes de Ruhmkorff*, se designan varias clases de transformadores destinados a producir corrientes secundarias de alta tensión por medio de una corriente primaria *continua*. Su invento es anterior al de los transformadores de corriente alterna: se debe al físico francés Masson. El primer transformador Masson fué construido por Ruhmkorff.

El carrete de Ruhmkorff (fig. 876) se compone de un núcleo rectilíneo de hierro dulce, formado por un haz de alambres de hierro para evitar las corrientes de Foucault. En este núcleo se enrolla el circuito primario; comprende pequeño número de espiras de gruesos alambres.

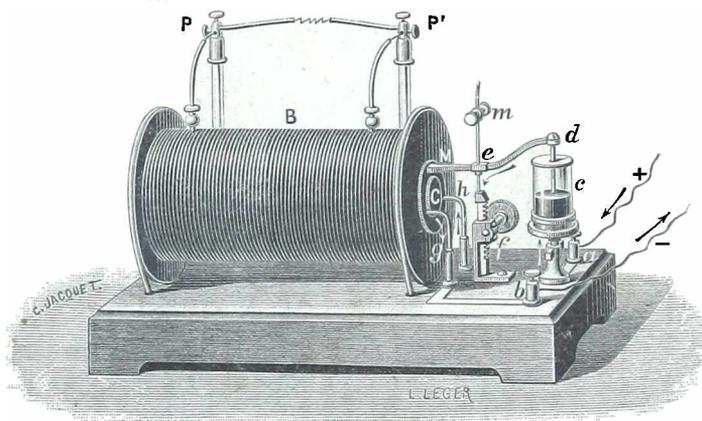


Fig. 876.

Por encima, y aislado cuidadosamente del carrete primario, se enrolla el circuito secundario. Está constituido por gran número de espiras de un alambre muy fino, aislado, cuyos extremos llegan a dos bornes aislados P y P'.

En los grandes carretes, se constituye el alambre inducido por carretes planos yuxtapuestos y unidos en serie después de separados por discos aisladores (882).

Para determinar las fuerzas electromotrices de inducción, en el secundario, se producen interrupciones y restablecimientos sucesivos de la corriente primaria. Realizanse automáticamente, por medio de un órgano especial llamado *interruptor* que va unido al carrete. Los sistemas de interruptores empleados son muy numerosos y difieren según la potencia del aparato.

Interruptor de martillo. — El más sencillo es el interruptor de martillo representado esquemáticamente en la figura 877. Se compone de una pequeña masa de hierro dulce *a* colocada frente al núcleo del carrete y sostenida por una lámina elástica de acero *b*. Esta lámina está fija en una columna de cobre *c* que comunica con un de los extremos del carrete primario. En el contacto con la lámina, se halla el extremo de un tornillo *v*, cuya rosca es otra columna de cobre *d*. Se pone *d* en comunicación con uno de los polos del generador de la corriente continua (pila o acumulador), estando, el otro polo, en relación con el extremo del carrete primario. Cuando se cierra el circuito de la pila, pasa la corriente, mediante el tornillo y la lámina *b*, e imanta al núcleo, el cual atrae la armadura *a*; entonces, cesa el contacto en *b* y se interrumpe la corriente. Como la imantación desaparece del núcleo, la armadura *a* deja de ser atraída y la elasticidad del resorte la vuelve a su primera posición. De nuevo se produce contacto en *b*, pasa la corriente y repitense los mismos fenómenos todo el tiempo que se quiera.

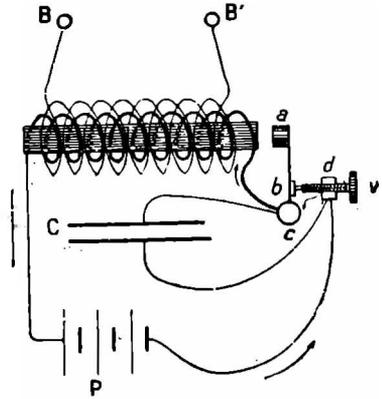


Fig. 877.

Chispa de self-inducción. — *Condensador de Fizeau.* — En el momento de la ruptura del circuito brota en *b* una chispa, debida a la fuerza electromotriz de self-inducción. Para evitar el rápido deterioro de las superficies que están en contacto, se las envuelve en platino.

Redúcese considerablemente la chispa y se hace mucho más brusca la interrupción, empleando un condensador inventado por Fizeau. Compónese éste de hojas de estaño superpuestas y aisladas unas de otras por hojas de papel grueso, bañadas en una solución de resina. Las hojas de estaño desbordan de dos en dos a derecha e izquierda (fig. 878). Unense entre sí los extremos *e, e', e''*, por una parte y *s, s', s''* por otra; estos dos paquetes de hojas forman las armaduras del condensador. El conjunto se halla contenido, generalmente, en la peana del carrete. Estas armaduras se colocan en derivación entre los puntos *c* y *d* del circuito primario (fig. 877). Más adelante (936), veremos que semejante sistema es capaz de absorber el flujo de electricidad debido a la self-inducción.

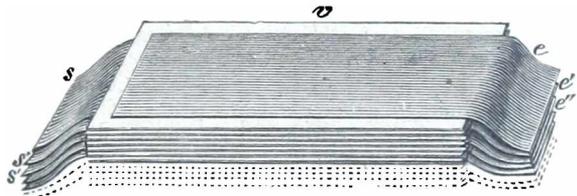


Fig. 878.

876. Efectos de inducción producidos en el circuito secundario. — En el momento de la interrupción de la corriente primaria, se produce en el circuito secundario una fuerza electromotriz de inducción del mismo sentido que la corriente primaria y tanto mayor cuanto más brusca ha sido la interrupción y cuantas más espiras posee el carrete inducido.

Del mismo modo, en el momento de cerrarse el circuito primario,

prodúcese, en el secundario, una fuerza electromotriz de inducción de sentido contrario a la primera. Siempre es mucho más débil que ésta, porque, a causa de la self-inducción, el establecimiento de la corriente primaria nunca es tan brusco como su interrupción.

Si se unen los extremos de los alambres secundarios por un conductor colocado entre los bornes P P' (876), cada vez que se interrumpa o que se vuelva a establecer la corriente primaria, una corriente inducida atravesará la secundaria. Si se acercan los extremos del alambre inducido, sin ponerlos en contacto, y si su distancia no es excesivamente grande, se ve que, a cada interrupción o cierre del circuito primario, brota una chispa eléctrica (962). En todos casos, merced a la pequeñez relativa de la fuerza electromotriz de inducción de cierre, la chispa sólo se produce en la ruptura en cuanto es un poco grande la interrupción en el circuito inducido: entonces, la corriente secundaria ya no pasa más que en un solo sentido.

877. Diagramas de las dos corrientes, primaria y secundaria. — 1º *Corriente primaria.*

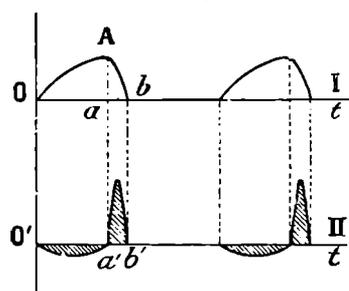


Fig. 879.

— Cuando el interruptor cierra el circuito primario, la corriente se establece siguiendo una ley representada por la curva OA (fig. 879. I). Hay que impedir que la interrupción de la corriente primaria no se efectúe ni muy pronto ni muy tarde; porque, en el primer caso, no alcanzaria su intensidad máxima, y, en el segundo, mientras conservase esta intensidad máxima no produciria ningún efecto de inducción y produciria una cantidad de calor perjudicial.

Cuando se produce la interrupción, la intensidad de la corriente primaria disminuye bruscamente y se anula (curva Ab).

Los mismos fenómenos se originan periódicamente mientras dura el funcionamiento del interruptor.

2º *Corriente secundaria.* — Durante el periodo de establecimiento de la corriente primaria, la secundaria tiene sentido contrario a aquélla (curva O'a'), y durante el periodo de disminución de la primaria, la otra tiene el mismo sentido (curva a'b').

Es de notar que son iguales las cantidades de electricidad producidas en estas dos fases, porque corresponden a una misma variación del flujo inductor (833).

Como la corriente inducida de *ruptura* dura mucho menos tiempo que la corriente inducida de *cierre*, resulta que la intensidad máxima de la corriente inducida de *ruptura* es mucho mayor que la de la corriente inducida de *cierre*.

Cuando el circuito secundario no se cierra prodúcese entre sus extremos una diferencia de potenciales variable que se puede representar por curvas análogas a las de la figura II.

Longitud de la chispa. Experimentos de Rayleigh y Armagnat. — En realidad, la teoría del carrete es muy complicada. La longitud de la chispa que puede producir un carrete, y que es su cualidad esencial, depende de la capacidad del condensador de Fizeau, de la capacidad secundaria, de la disposición del núcleo de hierro dulce. El estudio de los carretes de inducción ha dado lugar a investigaciones notables, teóricas y experimentales a la vez, de Rayleigh y Armagnat.

878. *Perfeccionamientos del interruptor de martillo.* — Varios físicos han tratado de perfeccionar el interruptor de martillo.

1º *Interruptor Marcel Depres.* — La armadura A (fig. 880) es móvil alrededor de un eje vertical y tiene un resorte r, que puede estar en mayor o menor tensión por un tornillo v, a fin de modificar a voluntad el periodo de oscilaciones. El contacto se establece en a, entre una pieza de platino que la armadura contiene y otra pieza, de platino también, que encierra el tornillo V.

2º *Interruptor Carpentier.* — *Ruptor atónico.* — Los interruptores de lámina vibrante

tienen un período de vibración determinada, casi independiente de la corriente empleada, de suerte que las rupturas de la corriente se producen siempre a intervalos iguales; pero como la duración del contacto entre la punta del tornillo y la lámina es variable, las interrupciones sucesivas de la corriente se producen por intensidades muy diferentes; de ahí resulta que las chispas son muy desiguales entre sí y que *fallan* muchas.

En el *ruptor atómico* de Carpentier (fig. 881) la ruptura del circuito no se puede producir sino cuando la intensidad de la corriente ha alcanzado un valor determinado y se produce siempre para esta intensidad. La lámina de hierro P oscila en una ranura en V; un resorte R paralelo a su dirección la atrae constantemente hacia atrás y la hace apoyar sobre un tornillo tope B. El circuito eléctrico se cierra entre los contactos de platino *a* y *b* que tienen la lámina de latón L, y el tornillo C. Cuando la corriente pasa por el carrete, el núcleo de hierro atrae a la lámina P; pero ésta no se mueve antes de que la atracción magnética sea igual a la reacción elástica del resorte R; tan pronto como

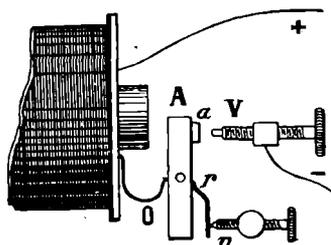


Fig. 880.



Fig. 881.

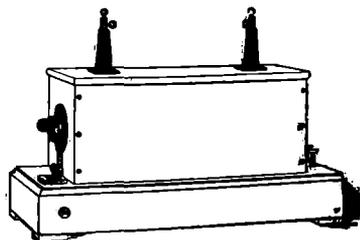


Fig. 882.

llega a ser preponderante la acción magnética, la lámina se separa de su tope y va a herir la lámina L, separando así los contactos *a* y *b*.

Gracias al intervalo que existe entre las láminas P y L, ésta última recibe un choque, evitando que la separación de los puntos *a* y *b* es muy rápida; además, los choques evitan las soldaduras de los contactos *a* y *b* por la chispa de self-inducción.

A este ruptor se le llama *atómico*, porque no tiene ningún período de vibración propia; el intervalo entre dos chispas depende de la tensión dada al resorte R por el botón M y de las condiciones eléctricas del circuito, fuerza electromotriz y resistencia.

OBSERVACIÓN. — La figura 882 representa uno de los tipos nuevos de carrete de Ruhmkorff, provisto del ruptor atómico. Los carretes están colocados en caja cerrada para evitar deterioraciones procedentes de choques o que se empolven.

879. **Interruptor de Foucault y sus derivados.** — En los grandes carretes, que utilizan corrientes primarias intensas, a pesar de emplear el condensador, las chispas de self-inducción se vuelven muy intensas y su elevada temperatura puede provocar la fusión local y la soldadura de las piezas de platino. En el interruptor de Foucault, se evita este inconveniente.

La armadura de hierro dulce M (fig. 876) está en una lámina elástica *e* provista de una punta vertical *d*. Esta punta se sumerge en mercurio contenido en un vasito, y sobre el cual hay un líquido aislador, alcohol, petróleo o simplemente agua destilada. El mercurio se hace comunicar con un polo de la pila, mientras que la lámina *e* comunica con el carrete primario. De este modo, se cierra el circuito y pasa la corriente; la armadura M es atraída y oscila alrededor de la lámina elástica, la punta sale del mercurio y se abre el circuito. Produce una chispa de self-inducción; pero no puede provocar ninguna soldadura; además, la presencia del líquido aislador la hace más corta que en el aire y la interrupción de la corriente primaria es más repentina.

Se han construido numerosos interruptores que son perfeccionamientos del de Foucault.

880. **Interruptores rotativos de contactos sucesivos.** — **Interruptor sin mercurio de Contremoulins.** — Se han construido varios interruptores, en forma de sistema giratorio, que establecen contactos sucesivos, con mercurio o sin él. El más práctico es el de Contremoulins. Un disco de ebonita, provisto de dos medias virolas de cobre, gira en torno de un eje vertical que un motor arrastra con una velocidad que puede pasar de 4 000 vueltas por minuto; en la circunferencia exterior del disco hay 2 escobas de carbón, sostenidas por resortes metálicos y en comunicación con los bornes de la corriente primaria. Una de ellas es fija y la otra puede ser acercada más o menos para modificar la duración del paso de la corriente primaria y, por consiguiente, su intensidad media. De este

modo se puede arreglar la longitud de la chispa desde 1 milímetro hasta el máximo que contiene el carrete. Un conmutador especial sirve para poner en movimiento el motor y por consiguiente el interruptor, antes de lanzar la corriente primaria del carrete.

881. Interruptor electrolítico de Wehnelt. — Interruptores de orificios. — El interruptor electrolítico de Wehnelt se funda en el principio siguiente. En un vaso lleno de agua acidulada al 10 por 100 se sumerge un alambre de platino F (fig. 883) soldado con el extremo

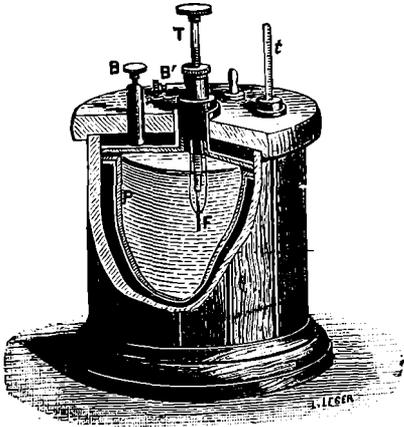


Fig. 883.

de un tubo de vidrio y puesto en comunicación con el polo positivo de una batería de acumuladores, cuyo polo negativo está en relación con una lámina de plomo P sumergida en el agua acidulada; en estas condiciones se oye un ruido estridente que proviene de las interrupciones y continuaciones frecuentes de la corriente. Intercalando en el circuito el alambre inductor de un carrete de Ruhmkorff se obtienen efectos muy potentes. Con un carrete grande se pueden tener 1 700 interrupciones por segundo, y con un pequeño, hasta 3 000. Este número depende de la inducción refleja del carrete, de las dimensiones del alambre de platino y de la tensión de la corriente.

La explicación del fenómeno es sencilla; como el alambre de platino se pone incandescente por el paso de la corriente, queda suprimido el contacto por la calefacción e interrumpida la corriente. Un instante des-

pués se restablece tan pronto como se enfría el alambre y así sucesivamente.

Interruptor de orificios. — Se constituye un interruptor llamado *de orificios*, con un vaso electrolítico que contenga agua acidulada, dividido en dos partes por un tabique horadado con uno o más orificios de un milímetro de diámetro aproximadamente. Se pasa la corriente por medio de dos electrodos de plomo que se sumergen respectivamente en las dos partes del vaso. En los orificios estrechos, por donde tiene que pasar la corriente se producen fenómenos análogos a los del interruptor Wehnelt.

Se han construido diversos interruptores de orificios fundados en este principio y que sólo se diferencian en detalles de construcción. Tales son los interruptores Simon, Caldwell y Campbell-Swinton.

882. Aislamiento de los carretes de inducción. — En los carretes de inducción, pueden producirse, entre dos espiras contiguas, una chispa que perfora el aislador y deja el aparato fuera de uso. Esta chispa se debe a que los dos puntos del conductor, que se aproximan de ese modo, están en el circuito inducido, separados por una gran longitud de alambre, y, por consiguiente, presentan gran diferencia de potenciales. Por esta razón, el circuito secundario de los carretes se divide en varios carretes, separados por discos aisladores.

Además, conviene emplear un aislador líquido (aceites densos de petróleo) o, cuando menos, pastosos (mezcla de aceite denso y parafina). En este caso, si se produce una chispa, el aislador se cierra después de su paso y, esto no origina ningún inconveniente.

883. Aplicaciones de los carretes de inducción. — Más adelante, veremos las aplicaciones más importantes de los carretes de inducción, que son la producción de los rayos X y de las ondas electromagnéticas para la telegrafía sin hilos; éstas han determinado, durante estos últimos años, notables perfeccionamientos en los carretes e interruptores.

También se emplean carretes de inducción en los laboratorios químicos, para producir chispas en el eudiómetro o para someter cuerpos a los efluvios eléctricos.

Finalmente, las corrientes inducidas de los carretes se aplican en terapéutica. En estos casos se usan carretes muy pequeños que producen una chispa de 1 o 2 centímetros a lo sumo. El alambre secundario termina, bien en unos mangos que el enfermo agarra con las manos, bien en láminas que se pasan por la parte enferma.

LIBRO X

FENÓMENOS DE EQUILIBRIO Y DE TENSIÓN ELÉCTRICOS

CAPÍTULO I

LEY DE COULOMB. — MEDIDA DE LAS CARGAS ELÉCTRICAS. CONSERVACIÓN DE LA ELECTRICIDAD.

884. **Ley de Coulomb.** — **Masa eléctrica.** — Ya hemos visto (721, 722) las circunstancias en que un cuerpo conductor o aislador puede ser *electrizado* o, en otros términos, *cargado de electricidad*. También hemos indicado (723) que existen dos modos de *electrización* o dos clases de *electricidad*: *electricidad positiva* y *electricidad negativa*. En la *electroestática*, se estudian las leyes de la electricidad en equilibrio. Una de las más importantes, la *ley de Coulomb*, se refiere a la acción mutua de los cuerpos electrizados. Si se acerca un cuerpo electrizado a un péndulo eléctrico cargado (723), se ve que la fuerza de atracción o la fuerza de repulsión es cada vez mayor, a medida que se acercan los dos cuerpos. Coulomb, físico francés, halló experimentalmente las leyes de estas fuerzas eléctricas.

El aparato que utilizó es una *balanza de torsión*, análoga a la empleada por Cavendish para estudiar la atracción newtoniana (89). Los experimentos de Coulomb sólo ofrecen interés histórico. No los describiremos. Pero, las leyes por él enunciadas, a pesar de haberlas hallado mediante experimentos poco precisos, deben reputarse exactas, porque todas sus consecuencias han sido comprobadas por experimentación.

LEY DE LAS ATRACCIONES Y REPULSIONES ELÉCTRICAS. — *Dos cuerpos electrizados A y B (fig. 884), lo suficientemente pequeños para que se puedan despreciar sus dimensiones en proporción con su distancia (puntos electrizados), ejercen uno sobre otro una fuerza de atracción o de repulsión (según la naturaleza de su carga) dirigida siguiendo la recta que los une, y que varía en razón inversa del cuadrado de sus distancias.*



Fig. 884.

Definición de la masa eléctrica. — Sea A un punto electrizado positivamente, sobre el cual obra otro punto B, electrizado también positivamente. Por analogía con las leyes de la gravedad y con las de las atracciones magnéticas, dicese que un cuerpo B' tiene la misma *masa eléctrica* que B, si ejerce sobre A, colocado a igual distancia, la misma repulsión que B. Si la fuerza, sin dejar de conservar la misma intensidad, se vuelve atractiva cuando se sustituye B por B', diremos que B está cargado de una *masa eléctrica negativa* equivalente a la *masa eléctrica positiva* de B. Si la fuerza repulsiva o atractiva ejercida entre A y B' es doble, triple, etc., que la fuerza que se ejerce entre A y B, se dice que la masa eléctrica, positiva o negativa, de B' es, en valor absoluto, doble, triple, etc., que la de B. En resumen, esta proposición, que no es sino una definición, puede enunciarse así :

La fuerza que se ejerce entre dos cuerpos electrizados es proporcional a sus masas eléctricas.

Unidad de masa eléctrica. — Como *unidad de masa eléctrica*, se ha escogido la masa eléctrica de un punto electrizado que, colocado a 1 centímetro de otro punto de igual masa eléctrica, ejerce sobre él una fuerza igual a una dina.

Esta unidad se llama también *unidad electrostática de cantidad de electricidad*.

Fórmula de las leyes de Coulomb. — Por consiguiente, si dos cuerpos de masas eléctricas m, m' están colocados a una distancia d cm., obran uno sobre otro con una fuerza f dinas $= \frac{mm'}{d^2}$. Si m y m' son del mismo signo (electricidades del mismo nombre : repulsión) f , es positiva; si m y m' son de signos contrarios (electricidades de nombre contrario : atracción), será f negativa.

885. Relación entre la cantidad de electricidad y la masa eléctrica. — Ya hemos visto (725) que se puede electrizar un cuerpo por medio de una pila, que proporciona cierta *cantidad de electricidad*. Por otra parte, el cuerpo, una vez cargado, posee cierta *masa eléctrica*. La teoría y la experimentación demuestran que *estas dos magnitudes varían siempre en la misma relación*. Miden, pues, la misma propiedad, que podremos llamar *carga eléctrica del cuerpo*. La única diferencia está en las unidades que sirven para medirla. Varios experimentos, en cuyo detalle no podemos entrar, demuestran que la unidad práctica de cantidad de electricidad, el culombio, vale tres mil millones (3×10^9) de unidades de masa eléctrica.

De ahí se deduce cuán pequeñas son las cantidades de electricidad desarrolladas por frotamiento, al lado de las que proporcionan las corrientes eléctricas. Si fuera posible cargar dos puntos electrizados, de un culombio cada uno ($m = 3 \times 10^9 = m'$), colocados a un kilómetro ($d = 100000 = 10^5$ cm.), se rechazarían con una fuerza f dinas $= \frac{91 \times 0^{18}}{10^{10}} = 9 \times 10^8$ dinas, o sea, próximamente, 900 kilogramos peso.

886. Comparación de las cargas eléctricas por medio del cilindro de

Faraday. — Sea C (fig. 885) un conductor hueco cilíndrico, aislado en un pie de parafina P; pongámoslo en comunicación con el vástago de un electroscopio de panes de oro (724) cuya caja metálica comunique con el suelo. Supongamos que detrás de los panes del electroscopio se haya colocado una graduación que permita apreciar la separación de estos panes*. El conjunto de este aparato, se denomina *cilindro de Faraday*. Acercuemos al cilindro un cuerpo A, cargado positivamente, por ejemplo, y sujeto a un vástago aislador, y veremos que se apartan las hojas de oro. Puede reconocerse que están cargadas positivamente (899).

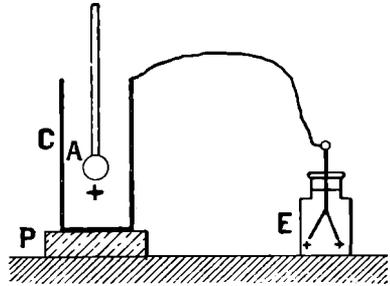


Fig. 885.

Si se introduce el cuerpo en el cilindro, la desviación aumenta a medida que penetra cada vez más el cuerpo electrizado; pero cuando se halla a distancia suficientemente grande de la abertura, se observa que la desviación del electrómetro permanece constante**.

Si se sustituye el cuerpo A, por otro cargado negativamente, se reproducen los mismos efectos, con la sola diferencia de que los panes de oro adquieren carga negativa.

Si se repite el mismo experimento con diversos cuerpos electrizados, la desviación de los panes será, en general, diferente para cada cuerpo.

Se reconoce que dos cuerpos tienen la misma carga eléctrica, si, introducidos sucesivamente en el cilindro de Faraday, producen la misma desviación de los panes de oro del electrómetro.

Del mismo modo, se conoce que un cuerpo B tiene una carga 2, 3, 4, veces mayor que un cuerpo A, si, en el experimento precedente, hace desviar el electrómetro en un mismo ángulo que 2, 3, 4 cuerpos que tengan la misma carga que A, introducidos simultáneamente en el cilindro.

Finalmente, se reconoce que dos cuerpos A y B tienen cargas de signos contrarios, iguales en valor absoluto, si, introduciéndolos sucesivamente en el cilindro de Faraday, los panes del electrómetro toman la misma desviación; pero están cargados de signo contrario.

Otro fenómeno experimental: *Si se introducen simultáneamente en el cilindro de Faraday, varios cuerpos cargados unos positiva y otros negativamente, la desviación de las hojas de oro del electrómetro no depende sino de la suma algébrica de las cargas eléctricas de los cuerpos introducidos en el cilindro.*

Tomemos, por ejemplo, por unidad, la carga positiva de un cuerpo A e introduzcamos juntos dos cuerpos que tengan cargas positivas 2 y

* De este modo, el aparato queda transformado en *electrómetro* (945).

** En realidad, esto no es rigurosamente exacto sino cuando el conductor hueco está cerrado por todas partes. Se puede observar, reemplazando el electrómetro de panes de oro, por un aparato más sensible, tal como el electrómetro de cuadrantes (946).

3 : la desviación del electrómetro será la misma que si se hubieran introducido 5 cuerpos de la misma carga que A.

Del mismo modo, introduzcamos dos cuerpos que tengan cargas iguales, pero de signo contrario : los panes de oro no sufrirán ninguna desviación *.

887. Desarrollo simultáneo de las dos electricidades. — Principio de la conservación de la electricidad. — Por medio de mangos aisladores, tomemos un disco de cristal y otro de madera forrada de paño (fig. 886) y frotémosles uno contra otro. Después de separados, observaremos, mediante un péndulo eléctrico, que el cristal se ha cargado positivamente y el otro disco negativamente. Este fenómeno es general; luego *cada vez que aparece electricidad positiva en uno de los cuerpos frotados, aparece, al mismo tiempo, electricidad negativa en el otro.*

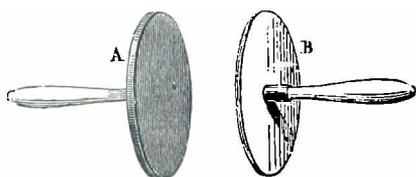


Fig. 886.

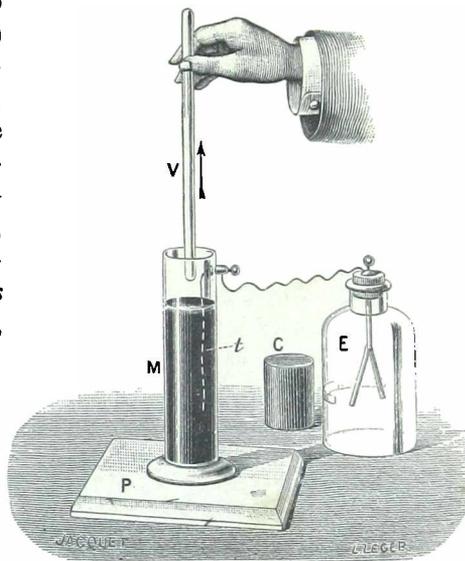


Fig. 887.

Además, si se repite este experimento aislando un frotador de lana en el fondo de un cilindro de Faraday y frotando contra él una varilla de vidrio, se observa que, aun después de separados los dos cuerpos, resulta nula la desviación del electrómetro, con tal que no se quite del cilindro la varilla de vidrio. De ahí se deduce que la cantidad de electricidad negativa desarrollada en la lana *es igual en valor absoluto* a la cantidad de electricidad positiva desarrollada en el vidrio.

Experimento de Kirchhoff. — He aquí otra prueba debida a Kirchhoff. Una probeta de peana, aislada en un bloque de parafina P (fig. 887), contiene mercurio muy seco M que comunica con el botón de un electroscopio E, por medio de un vástago de hierro t y de un hilo metálico. Si se sumerge en el mercurio una varilla de vidrio V, los panes del electroscopio permanecen en contacto; pero se separan tan pronto como empieza a retirarse la varilla, y divergen cada vez más, hasta que la varilla quede completamente retirada; pero, si se vuelve a sumergir el vidrio en el mercurio, anúlase la divergencia.

* Todos los experimentos procedentes pueden efectuarse con mayor precisión reemplazando el electrómetro do panes de oro por un electrómetro de cuadrantes (946). Pero, por ser mucho más sensible este aparato, es preciso, para que salgan bien los experimentos, que el cilindro no posca sino una abertura estrecha.

Estos fenómenos son casos particulares de un principio muy general conocido con el nombre de *Principio de la conservación de la electricidad*.

Siempre que, en un fenómeno, se desarrolla cierta cantidad de electricidad positiva, aparece, al mismo tiempo, una cantidad equivalente de electricidad negativa.

O, en otros términos : *La suma algébrica de las cantidades de electricidad contenidas en un sistema de cuerpos aislado permanece siempre constante, sean cuales fueren los fenómenos que en él se produzcan.*

CAPÍTULO II

ELECTRIZACIÓN SUPERFICIAL DE LOS CONDUCTORES. DISTRIBUCIÓN DE LA ELECTRICIDAD. TENSIÓN ELÉCTRICA.

888. Electrización superficial de los conductores. — La electrización de un conductor es una propiedad que pertenece exclusivamente a su superficie. Nos convenceremos de ello por el experimento siguiente :

Tomemos un conductor hueco S (fig. 888), aislado en un pie de parafina y que presente una abertura que pueda cerrarse por una tapadera c, a la que está unida, por una hebra de seda, una bola B*. Carguemos el cuerpo S, por frotamiento, por ejemplo. Si, tomando la tapadera c, por medio de un gancho aislador V, se toca la superficie exterior de S con la bola B, se observa, acercándola a un electroscopio, que B se ha electrizado. Introduzcamos, al contrario, la bola B en el interior de la esfera, cerrán-

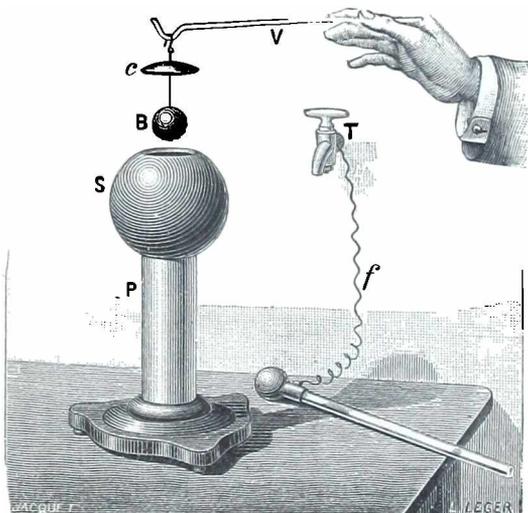


Fig. 888.

dola herméticamente con la tapadera y hagamos tocar la bola B, inclinando, por ejemplo, el soporte P, y observaremos, al salir B, que no presenta huella alguna de electrización. Si, al contrario, S se halla en

* Aparato de Lippmann.

estado neutro y B está cargada, resultará que, después del contacto interior, B se descarga y S se electriza. Este fenómeno se expresa diciendo que la carga de B pasa a la superficie externa de S. Este mismo experimento puede repetirse, aunque S esté ya cargada.

Se ve que, por este aparato, puede hacerse pasar sobre un cuerpo tal como S, la electricidad de diversos *conductores*. Por otra parte, no es indispensable que S esté completamente cerrada. Se puede poner sencillamente a B en el extremo de un vástago aislador y hacerla tocar la superficie interna de S, sin cerrar la abertura; el experimento sale bien, siempre que la abertura no sea demasiado ancha*.

889. Distribución de la electricidad en la superficie de un conductor. — Coulomb demostró experimentalmente que la propiedad eléctrica de un conductor, cargado, separado de cualquier otro conductor, no está, en general, repartida uniformemente por su superficie.

Para repetir experimentos análogos a los de Coulomb, se emplea un *plano de prueba*. Este es un pequeño disco metálico delgado, fijo en el extremo de un vástago aislador. Se le aplica a una pequeña región de un conductor electrizado, a cuya superficie se sustituye de modo que, al retirarlo, se dirige a él una cantidad de electricidad si no igual, cuando menos proporcional a la carga de esta región.

Si se lleva el plano de prueba a un cilindro de Faraday, se ve que, tratándose de un conductor de forma esférica, el plano de prueba, aplicado a los diversos puntos de la superficie, lleva siempre la misma cantidad de electricidad. Por otra parte, esto es evidente, por razones de simetría. Pero, si el conductor es de forma alargada, verbigracia, ovalada, se observa que la cantidad de electricidad arrastrada por el plano de prueba es mayor en las puntas que en la sección ecuatorial.

Los experimentos demuestran igualmente que por todas las partes en que un conductor presente secciones salientes, la electricidad se acumula en ellas; mientras que se encuentra en cantidades más pequeñas en las partes planas y, sobre todo, en las entrantes. Ya hemos visto que en la superficie interior de un cuerpo hueco no hay ninguna electricidad. Si un cuerpo posee puntas o aristas, la electricidad se acumula en ellas en cantidad considerable.

890. Densidad eléctrica superficial. — Llámase *densidad eléctrica superficial en un punto* de una superficie cargada uniformemente (como la superficie de una esfera electrizada), *a la carga de un elemento, de 1 centímetro cuadrado de superficie, que rodea el punto*. La densidad eléctrica así definida es la misma en todos los puntos de una esfera o de un plano indefinido electrizados.

Tratándose de un cuerpo de cualquier forma, en que no esté uniformemente repartida la electricidad, llámase densidad eléctrica *media* en

* De la ley de Coulomb, se deduce, por cálculo, que en el interior de un cuerpo conductor no puede haber electricidad libre.

Recíprocamente, como este fenómeno está demostrado directamente por experimentos, puede, a su vez, servir, ya para comprobar indirectamente la ley, ya para hallarla por cálculo, como lo ha efectuado Bertrand.

un elemento de superficie a la relación entre la carga eléctrica de esta superficie y su área.

El límite hacia el cual tiende esta relación, cuando la superficie tiende hacia cero, al mismo tiempo que su perímetro, se llama *densidad eléctrica en el punto con que tiende a confundirse la superficie*.

Para representar gráficamente los resultados de los experimentos sobre la distribución de la electricidad, se lleva a las normales tales como PA (fig. 889) a los diferentes puntos de la superficie conductora, longitudes proporcionales a la densidad eléctrica; la simple inspección de la figura indica la distribución de la electricidad. Se ve la distribución

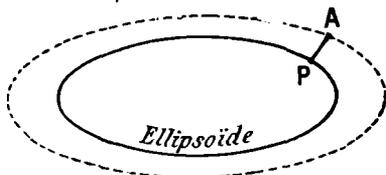


Fig. 889.

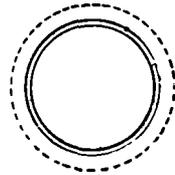


Fig. 890.

en un elipsoide (fig. 889) y la distribución uniforme en una esfera (fig. 890).

891. Tensión eléctrica. — *Se puede demostrar que las diferentes partes de la superficie de un conductor electrizado son rechazadas por las otras, que están cargadas de la misma electricidad.* Para esto, se electriza una superficie conductriz deformable, tal como un globo de gamuza metaliada y se lo verá inflarse.

También se ha demostrado que cada elemento de superficie está sometido a una fuerza normal a él y dirigida hacia el exterior. Para esto se dispone una pompa de jabón en un soporte de paño empapado en el mismo líquido y vuelto así conductor, y se electriza todo con una máquina eléctrica. Se ve que la pompa se infla y sube. Como las fuerzas eléctricas obran en distinto sentido que la presión atmosférica, aumentan el volumen de la pompa; el impulso del aire aumenta también, mientras que el peso permanece constante, lo cual explica la ascensión. Y como, cuando la pompa de jabón está alejada de todo conductor, permanece perfectamente esférica, se deduce que la tensión eléctrica es normal a cada elemento de superficie y uniforme, es decir, que, en elementos de áreas iguales, se ejercen tensiones eléctricas iguales.

Llámacese *tensión eléctrica en un punto* de la esfera, la fuerza (expresada en dinas) que se ejerce en 1 cm. cuadrado que rodee a dicho punto. Se puede demostrar que esta fuerza es proporcional al cuadrado de la densidad eléctrica en dicho punto. En efecto, si la carga total se hace p veces mayor, ocurre lo mismo con la densidad eléctrica; pero, como la fuerza ejercida en el elemento de superficie es a la vez proporcional a la carga de este elemento y a la de las otras partes que lo rechazan, esta fuerza, que es la tensión eléctrica, se vuelve p^2 veces más grande.

Si se trata de un cuerpo cuya densidad eléctrica no es uniforme, sucederá lo mismo con la tensión. Para definir la *tensión en un punto de la superficie*, se toma el cociente de la fuerza eléctrica (expresada en dinas) ejercida en una superficie muy pequeña que rodee al punto, por el área de esta superficie (expresada en centímetros cuadrados). De

este modo se obtiene la tensión eléctrica media en la superficie considerada. El límite hacia el cual tiende esta magnitud, cuando la superficie tiende hacia cero, es la tensión eléctrica en el punto con el cual tiende a confundirse la superficie.

En todos casos, se puede demostrar que la tensión eléctrica en cada punto es *proporcional al cuadrado de la densidad eléctrica en este punto*.

Además, dicha tensión se expresa, en función de la densidad eléctrica superficial Σ en el punto considerado, por la fórmula $M = 2\pi\Sigma^2$ (908), expresándose Σ en unidades de masa eléctrica por cm.². Si σ representa la densidad eléctrica en culombios por cm.², tendremos

$$T = 2\pi\sigma^2 \times 9 \times 10^{18}.$$

892. Acción de las puntas. — Viento eléctrico. — Cuando un conductor electrizado termina en punta, la densidad y, por tanto, la tensión se vuelven muy grandes, hasta vencer la resistencia del aire; entonces la electricidad sale por la punta. Si se acerca la mano a la punta, se siente un ligero soplo, debido a una repulsión del aire por la punta. Este soplo, llamado *viento eléctrico*, puede apagar una bujía (fig. 891).

El derrame de electricidad por una punta

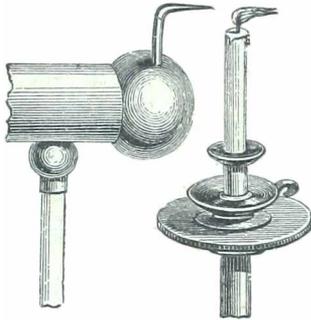


Fig. 891.

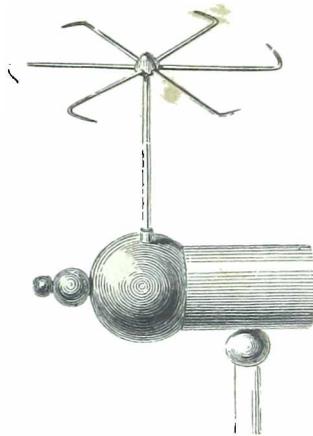


Fig. 892.

va acompañado por un fenómeno luminoso. En la oscuridad, se ve en la punta un penacho luminoso, si está cargada positivamente, y un simple punto brillante, si lo está negativamente.

Molinete eléctrico. — Al mismo tiempo que el aire es rechazado por la punta, éste la rechaza con fuerza igual. Esta acción se pone de manifiesto haciendo móvil la punta. Se forma un pequeño molinete (fig. 892) con cinco o seis radios metálicos doblados en el mismo sentido y terminados en punta y fijos en una chapa común móvil en un pie. Puesto este aparato en comunicación con un foco continuo de electricidad, adquiere un rápido movimiento de rotación en el sentido opuesto a las puntas.

CAPÍTULO III

INFLUENCIA ELECTROESTÁTICA

893. **Fenómeno fundamental.** — Coloquemos cerca de un conductor aislado B (fig. 893), un cuerpo A cargado positivamente, y observaremos, con un plano de prueba, que en el conductor B, las partes C más próximas a A se cargan negativamente, mientras que los puntos de la región D, más lejana, lo efectúan positivamente.

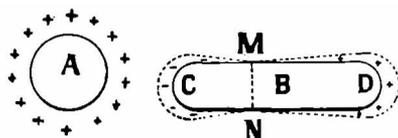


Fig. 893.

Además, en B, hay una línea MN en que no existe ninguna carga y que se llama *línea neutra*. En cuanto a las densidades eléctricas de las dos capas positiva y negativa, no son uniformes y varían de modo continuo, desde MN, en que ambas son nulas, hasta C y D, en que son máximas.

Además, se puede demostrar que las cargas positiva y negativa desarrolladas en B son equivalentes. En efecto, si se aleja el cuerpo A, el cuerpo B vuelve al estado neutro. Esto se demuestra fácilmente, uniendo a un electroscopio E, un conductor aislado A (fig. 894). Cuando se acerca un trozo de ebonita electrizado, se ve que las hojas de oro del electroscopio divergen. Vuelven a ponerse en contacto en cuanto se aleja el cuerpo electrizado. Si una de las dos cargas positiva y negativa del conductor PE hubiera tenido mayor cantidad que la otra, habría quedado al fin un exceso, que hubiera hecho desviar el electroscopio. Puesto que esto no ha ocurrido, es que las cargas tenían cantidades equivalentes.

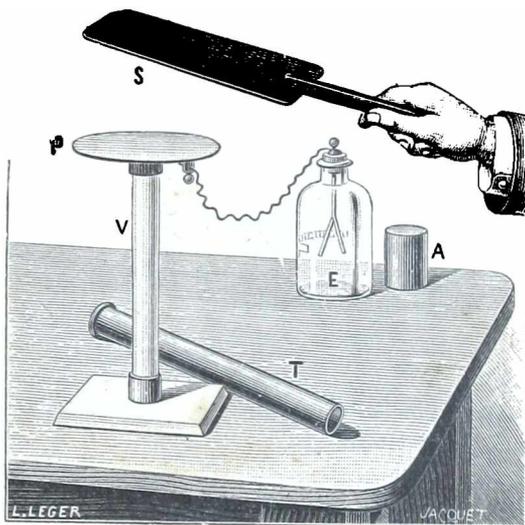


Fig. 894.

Este experimento demuestra también que en la electrización por influencia, hay conservación de electricidad, como en la electrización por frotamiento.

Todos estos hechos constituyen el fenómeno de la influencia electrostática.

894. **Carga de un cuerpo por influencia.** — Si se pone a B (fig. 893) en comunicación con el suelo, ora tocándolo, ora uniéndolo por medio de metal con una cañería de agua o de gas, se observará que la carga positiva de la región D desaparece, sea cual fuere la región tocada*.

Si, luego, se suprime la comunicación con el suelo y se aleja de B el cuerpo influyente A, la electricidad de la región C se esparce entonces por toda la superficie de B. Dicese que B se ha *cargado por influencia*, de electricidad de signo contrario al del cuerpo influyente.

895. **Caso de un conductor que envuelve al cuerpo influyente.** — Consideremos un conductor hueco, que se realiza bastante bien con un cilindro hueco, aislado en un pie de parafina (fig. 895) y cuyo orificio

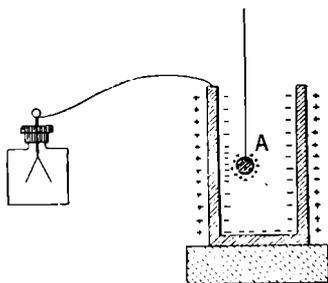


Fig. 895

puede cerrarse, en caso necesario, con una tapa perforada por un agujero (fig. 896). Si se introduce en él una bola conductora A, sujeta al extremo de una hebra de seda, y cargada positivamente, por ejemplo, se observará que la superficie interior se carga negativamente, mientras que la exterior se carga positivamente (por medio de un plano de prueba y de un cilindro de Faraday). Por otra parte, la experimentación demuestra que la distribución de la carga positiva exterior no depende de la

posición de A en el interior del cilindro, mientras que la densidad de la capa negativa interna depende de la posición de A: en los puntos próximos a A, es mayor que en los alejados de A.

Si se pone el cilindro en comunicación con el suelo, obsérvase que la electricidad positiva exterior desaparece sola, sea cual fuere el punto tocado, exterior o interior.

Si, después, hallándose de nuevo aislado del suelo el cilindro, se retira el cuerpo influyente, la carga negativa interna se reparte por la superficie exterior.

Análogos fenómenos se producen si el cuerpo influyente está cargado negativamente; pero, entonces, las cargas del cilindro son contrarias de lo que eran en el caso anterior.

896. **Teorema de Faraday.** — Las cantidades de electricidad desarrolladas por la influencia electrostática se determinan mediante una ley debida a Faraday y conocida con el nombre de *teorema de Faraday*:

Si un cuerpo electrizado se halla dentro de un recinto conductor aislado, se desarrolla, por influencia, en la superficie interna de la cubierta, una cantidad equivalente de electricidad contraria a la del cuerpo, y, en la superficie externa, una cantidad igual de electricidad de mismo nombre.

* Tal vez parezca, a primera vista, paradójico, que, poniendo en comunicación con el suelo el punto C, que tiene carga negativa, sea la carga positiva de la región D la que desaparezca. Pero, es preciso notar que se ignora por completo la verdadera naturaleza de la electricidad, y que lo que llamamos movimiento de la electricidad no puede asimilarse del todo al movimiento de un fluido.

Esta proposición puede deducirse teóricamente de la ley de Coulomb o bien demostrarse directamente de modo experimental, lo cual constituye una demostración *a posteriori* de la ley de Coulomb.

Experimentos de Faraday. — 1º Se toma un cilindro metálico hueco C (fig. 896, I), dispuesto sobre una placa de parafina P y que comunica por el alambre *f'* con un electroscopio lejano E. Después se hace bajar

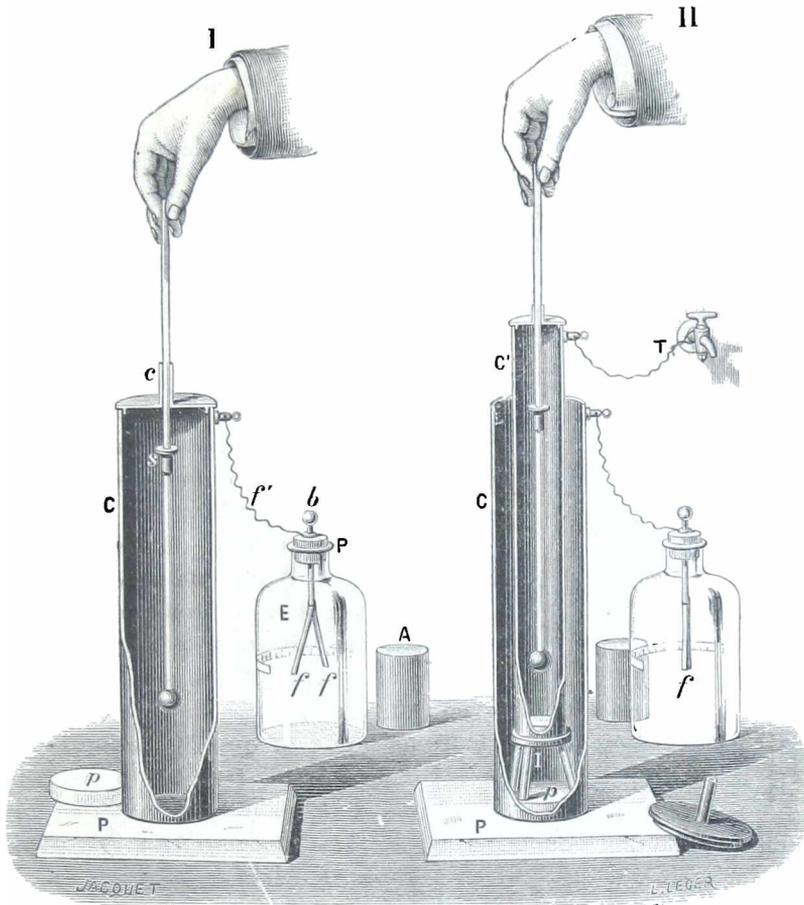


Fig. 896.

lentamente a la cavidad una bola electrizada, positivamente por ejemplo, y suspendida de un vástago aislador. En seguida las hojas divergen, indicando una carga positiva, conforme a las leyes de la influencia. La magnitud de la divergencia indica a cada instante la de la carga inducida. Obsérvase que la separación empieza por aumentar a medida que la bola baja. Desde que la tapadera *c* cierra el cilindro, como el inductor queda envuelto por entero, la divergencia permanece constante, lo cual prueba que la carga inducida ha alcanzado su máximo. La divergencia no aumenta más cuando la bola llega a ponerse en contacto de las paredes; ahora bien, en este momento la bola y el cilindro forman un solo conductor; toda la

electricidad debe estar en la superficie exterior, es decir que al mismo tiempo debe pasar la carga de la bola y la de la superficie interna. Si la carga inductora fuera superior a la negativa inducida, el exceso iría en parte a unirse con la carga positiva del electroscopio y aumentaría su divergencia. Si, por el contrario, esta carga fuera inferior, el exceso de electricidad negativa neutralizaría en parte la carga positiva de la superficie externa y del electroscopio : entonces disminuiría la divergencia. Pero no sucede así : luego, la carga interna desarrollada por influencia era igual a la carga influyente a partir de la posición en que quedó cerrada la cavidad cilíndrica.

2º Si se repite el mismo experimento después de haber introducido C en un segundo cilindro C' (fig. 896, II) aislado del primero por un disco de parafina P y por un soporte I de pies de vidrio, destinado a recibir el cuerpo inductor, se observa que el electroscopio no sufre acción ninguna, con tal que se tenga cuidado de poner a C' en comunicación con el suelo por medio de la cañería T. Esto prueba que en el caso de que lo inducido *esté en el suelo*, las cargas interiores (la influyente y la desarrollada por influencia) son equivalentes y están distribuidas de modo que no produzcan en lo exterior sino una *acción nula* (902).

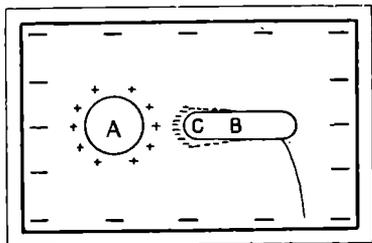


Fig. 897.

OBSERVACIÓN. — En caso en que el conductor B en que se ejerce la influencia (fig. 897) no rodee completamente al cuerpo influyente A, las cargas que en él se desarrollan son, en valor absoluto, menores que las del cuerpo influyente.

Esto es consecuencia del teorema ; puesto que las mismas paredes de la sala en que se efectúa el experimento, forman un recinto conductor en cuya superficie interna se desarrolla una carga equivalente a la de A. Cuando se pone a B en comunicación con el suelo, se le une al recinto, del cual forma entonces parte. Conserva, en C, sólo una fracción de la carga total del recinto.

897. **Influencia en un conductor ya cargado.** — Supongamos que se acerca un conductor A (fig. 898, I), cargado positivamente, a otro conductor B, cargado también positivamente : se observará, por medio de un plano de prueba, que la densidad eléctrica disminuye en C' y aumenta en D'. Si se acerca lo bastante A, la carga puede anularse en C',

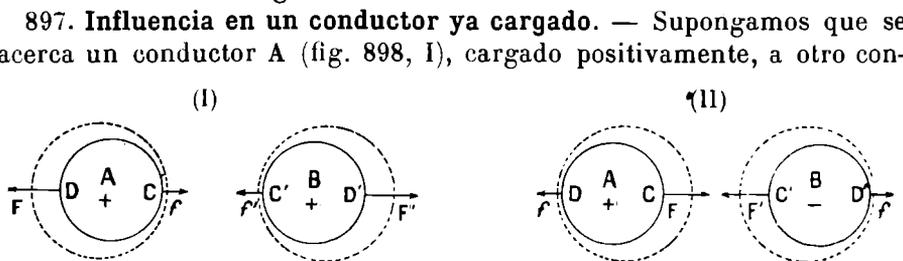


Fig. 898.

Se acerca un conductor A (fig. 898, I), cargado positivamente, a otro conductor B, cargado también positivamente : se observará, por medio de un plano de prueba, que la densidad eléctrica disminuye en C' y aumenta en D'. Si se acerca lo bastante A, la carga puede anularse en C',

y hasta puede, en una distancia menor aún, volverse negativa. Al mismo tiempo, la densidad de A sufre cambios análogos.

Si, por el contrario, se carga B negativamente (fig. 898, II), al acercarse A, cargado positivamente, la densidad eléctrica aumenta en C' y en C y disminuye en D' y en D.

CAPÍTULO IV

EFECTOS DE LA INFLUENCIA ELÉCTRICA PANTALLAS ELÉCTRICAS. — DIELECTRICOS

898. Explicación de las atracciones y de las repulsiones eléctricas.

— Las atracciones y repulsiones eléctricas se deben al cambio que produce la influencia en la distribución eléctrica. Estudiemos de cerca el fenómeno.

1º Si a una esfera conductora B, cargada positivamente, por ejemplo (fig. 898, I), se le aproxima una esfera A cargada del mismo signo, las tensiones eléctricas F y F', a consecuencia de la variación de la densidad superficial, se vuelven superiores a las tensiones f y f' en las regiones opuestas. De ahí resulta que cada esfera está sometida a una fuerza que tiende a apartarla de la otra. No obstante, si se acercan suficientemente los dos cuerpos, sabemos que, en C y C', pueden nacer capas negativas cuya densidad va creciendo a medida que se acerca A; también pudiera ocurrir, si A se aproxima mucho a B, que la repulsión se vuelva atracción. Por consiguiente, cuando se quiera estudiar la carga de un cuerpo por medio de un péndulo eléctrico, habrá que acercarse lentamente este cuerpo. En efecto, en caso de que esté cargado del mismo signo que el péndulo, se podría, aproximándolo demasiado, observar una atracción en lugar de una repulsión.

2º Si los dos cuerpos A y B están cargados de signo contrario (fig. 898, II), las tensiones aumentan en C y C' y disminuyen en D y D'; de donde resultan fuerzas que tienden a acercar los dos cuerpos.

3º En caso de que el cuerpo B, en estado neutro, esté aislado, la aproximación de A desarrolla dos capas C y D de signo contrario (fig. 893); pero la zona D es siempre más extensa que C; la densidad y, por consiguiente, la tensión eléctrica, son, por lo tanto, menores; la fuerza atractiva domina a la de repulsión.

4º Si se pone a B en comunicación con el suelo (fig. 897), la capa C persiste sola, y se observa una atracción más intensa que en el caso anterior. Por esta razón cuando, mediante un péndulo eléctrico, quiere manifestarse una electrización débil, es preferible tomar un péndulo que comunique con el suelo.

899. Uso del electroscopio de panes de oro. — Cuando se acerca al botón de un electroscopio (fig. 899, I), un cuerpo cargado de una electricidad cualquiera, la influencia produce, en aquél, electricidad de signo contrario a la del cuerpo, y, en los panes de oro, electricidad del mismo signo que éste. Como los panes se encuentran cargados de igual electricidad, se rechazan.

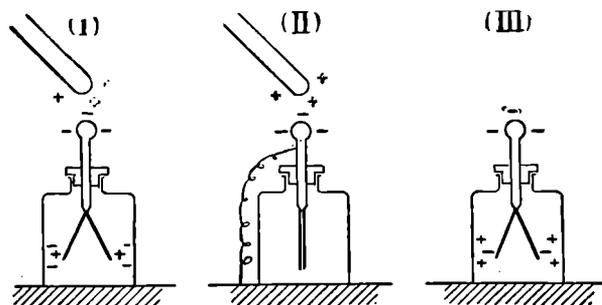


Fig. 899.

La divergencia aumenta por el efecto de la caja metálica del aparato, que se carga también, por la influencia de las hojas, y que atrae a éstas.

Para reconocer la naturaleza de la electricidad de un cuerpo, se carga primero el electroscopio. Para esto, se le acerca un cuerpo cargado positivamente (una barra de vidrio frotada) : las láminas de oro divergen, cargadas positivamente; si se pone el botón en comunicación con el suelo (fig. 899, II), la electricidad positiva se desvanece y caen los panes. Si se interrumpe entonces la comunicación con el suelo y se aleja la barra de vidrio (fig. 899, III), la electricidad negativa que cargaba el botón se esparce por todo el aparato y las láminas de oro divergen otra vez, pero, ahora, cargadas negativamente. (Con una varilla de ebonita frotada, se cargaría positivamente el aparato.)

Si, entonces, a un electroscopio cargado negativamente, se acerca despacio un cuerpo cargado positivamente, la influencia disminuye al principio la carga negativa de las hojas, y éstas divergen menos; para una posición bastante cercana, puede anularse la divergencia; vuelve a establecerse si se acerca más el cuerpo; pero los panes se cargan positivamente.

Por el contrario, un cuerpo cargado negativamente produce aumento de la divergencia, sea cual fuere la distancia.

Si se carga positivamente el electroscopio, se producen fenómenos inversos.

900. Comunicación de la electricidad a distancia. — Si en el experimento fundamental de la influencia (fig. 893) se acerca el cuerpo influido al influyente o viceversa, se ve brotar una chispa entre ellos, cuando están a muy poca distancia; al mismo tiempo, desaparece la electricidad negativa de la región C, lo mismo que una cantidad equivalente de la electricidad positiva de A; en B, queda una cantidad de electricidad positiva precisamente igual a la que desaparece en A, de modo que parece que dicha electricidad pasa de A a B. Por este mecanismo, se produce siempre el paso de la electricidad de un cuerpo a otro por el contacto. Antes del contacto, existe siempre influencia

y, si la distancia es suficientemente pequeña, prodúcese una chispa.

Si se acerca a A un cuerpo B (fig. 897) en comunicación con el suelo, — por ejemplo, un dedo — brota una chispa, y A se descarga por completo.

Si el cuerpo B en que se ejerce la influencia tiene una o varias puntas vueltas hacia A, la electricidad negativa de C se escapa silenciosamente y va a neutralizar una porción equivalente de la carga positiva de A. Si B está aislado, queda cargado positivamente, como en el caso anterior. Si se halla en comunicación con el suelo, el fenómeno continúa hasta que A esté descargado del todo.

PROPIEDADES DE LAS CAPAS ELÉCTRICAS EN EQUILIBRIO
PANTALLAS ELÉCTRICAS

901. Acción de un conductor electrizado sobre un cuerpo colocado en su interior. — Faraday fué el primero que demostró el siguiente fenómeno :

La capa de electricidad que recorre la superficie de un conductor aislado no ejerce ninguna acción eléctrica sobre un cuerpo situado en su interior.

Los experimentos de Faraday pueden repetirse en pequeño, colocando, en el interior de un cuerpo hueco, un electroscopio de hojas de oro. Y aunque se electrice intensamente el conductor, el electroscopio no se desvía. Para esto no hace falta que el conductor sea perfectamente continuo. Puede poseer aberturas, aunque sean anchas. También puede constar de una verdadera jaula formada por una reja metálica (jaula de Faraday).

Estos experimentos demuestran que la capa eléctrica superficial no produce ninguna influencia eléctrica en su interior.

De aquí resulta que no ejerce ninguna fuerza sobre un cuerpo interior electrizado, porque no hay influencia eléctrica en una región sino cuando en ésta pueda ejercerse acción sobre un cuerpo electrizado colocado en ella.

902. Pantallas eléctricas. — Del fenómeno precedente, resulta la consecuencia que sigue :

Una superficie conductora cerrada puede proteger a un cuerpo interior contra las acciones eléctricas de cuerpos exteriores.

En efecto, coloquemos un electroscopio en el centro de una jaula conductora aislada (basta colocar la tapadera en el aparato) y acerquemos un cuerpo A (fig. 900) cargado intensamente : el electroscopio no se desvía. Como en el experimento anterior, en éste no es necesario que el conductor sea absolutamente continuo; puede estar formado por una verdadera jaula de mallas, aunque sean muy anchas. Dícese que tal jaula forma una *pantalla eléctrica* para los puntos situados en su interior.

Este fenómeno demuestra que las capas eléctricas que se producen en C y en D (fig. 900) se establecen en equilibrio, de tal manera que su acción sobre cualquier punto interior equilibra la acción del cuerpo

electrizado exterior. Prodúcese el mismo fenómeno si la jaula protectora está en comunicación con el suelo.

Aplicación. — Esta propiedad se utiliza muy a menudo para proteger un aparato delicado contra acciones eléctricas demasiado intensas. Por ejemplo, en el electroscoPIO de caja metálica, la influencia sólo se produce en el botón exterior, mientras que en el de caja de vidrio, las hojas de oro, que son atraídas al acercar un cuerpo electrizado, pueden torcerse y romperse.

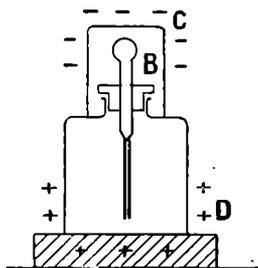


Fig. 900.

OBSERVACIÓN. — Un recinto conductor *aislado* que contiene en su interior un cuerpo electrizado, no forma pantalla eléctrica para los puntos exteriores. Para probar este fenómeno, basta introducir en el interior de un cilindro conductor, aislado, un cuerpo electrizado cualquiera: se observará que el cilindro atrae los cuerpos exteriores (fig. 901, I). Pero, si se pone el cilindro en comunicación con el suelo, ya no atrae los cuerpos exteriores: entonces, forma para éstos

una pantalla eléctrica (fig. 901, II).

Este último experimento demuestra que la capa interior desarrollada por la influencia ejerce, en un punto exterior, una acción que equilibra la del cuerpo electrizado situado en el cilindro. En el primer

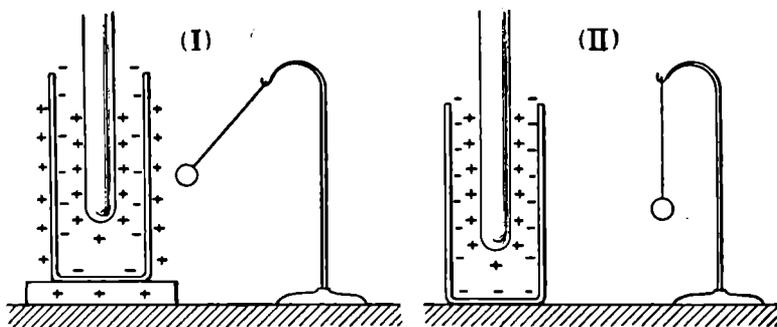


Fig. 901.

caso, quedaba la capa exterior, que ejercía su acción como si hubiera quedado sola.

903. **Dieléctricos.** — Los cuerpos aisladores, al contrario de los conductores, no forman pantallas eléctricas; las acciones eléctricas se ejercen a través de ellos. Por esta razón se denominan *dieléctricos*.

Influencia sobre los dieléctricos. — *Polarización.* — En la proximidad de un conductor electrizado A (fig. 902, I), un dieléctrico sólido B acaba, al cabo de más o menos tiempo, por tener una electrización que persiste cierto rato después de la influencia. Si el cuerpo sobre que se

ejerce la influencia es, por ejemplo, una barrita, se nota, al romperla, que presenta electrificaciones de signo contrario en las dos caras C'D'

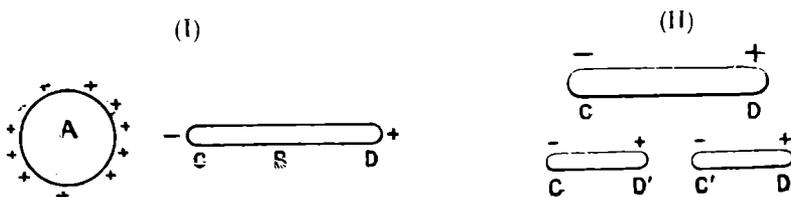


Fig. 902.

así determinadas (fig. 902, II). El estado de esta barra es, pues, completamente análogo al de un imán : dicese que el dieléctrico *se polariza*.

CAPÍTULO V

CAMPO ELÉCTRICO. — LÍNEAS DE FUERZA POTENCIAL ELÉCTRICO

904. **Campo eléctrico.** — Un pequeño cuerpo electrizado próximo a otros cuerpos electrizados se halla sometido a una fuerza*. Si dicho cuerpo es suficientemente pequeño, denominase *punto electrizado*.

Llámanse *campo eléctrico* toda región en que un *punto electrizado* está sometido a una fuerza eléctrica.

El campo se caracteriza, en cada punto, por su *dirección*, su *sentido* y su *intensidad*. Llámense dirección y sentido del campo eléctrico en un punto, la dirección y el sentido de la fuerza ejercida en ese punto, sobre otro punto electrizado *positivamente*. Se denomina *intensidad* del campo en un punto la relación H entre la fuerza F que se ejerce sobre un pequeño cuerpo electrizado situado en este punto y la carga q de dicho cuerpo pequeño (**): $H = \frac{F}{q}$.

905. **Líneas de fuerza.** — **Fantasmas eléctricos.** — Supongamos un cuerpo electrizado móvil que parte de un punto A (fig. 903) y se mueve siempre en la dirección que tiene el campo en el punto en que se encuentra. Dicho cuerpo describirá una curva, que, en cada uno de sus

* Se debe suponer el cuerpo lo bastante pequeño para que puedan despreciarse sus dimensiones, y suficientemente cargado para que no produzca sino una influencia insensible en los conductores próximos. A no ser por esta última condición el cuerpo sería atraído por dichos conductores, aunque éstos no se hallasen primitivamente cargados.

** Según esto, se podría decir que la intensidad del campo se mide por la intensidad de la fuerza ejercida en un punto cargado con la unidad de cantidad de electricidad; pero sabemos que debe tomarse muy pequeña la carga del punto electrizado.

puntos, es tangente a la dirección del campo en este punto : se le da el nombre de *línea de fuerza del campo eléctrico*. Es la trayectoria que

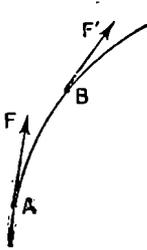


Fig. 903.

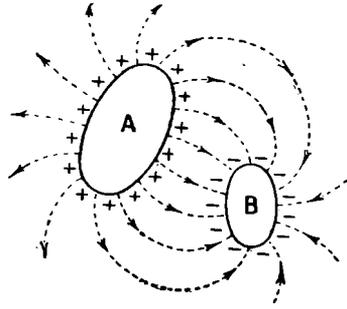


Fig. 904.

seguiría un punto electrizado positivamente, que partiera de A y estuviese en libertad de obedecer a la fuerza eléctrica que lo solicita. Llámase *sentido de la línea de fuerza* al sentido en que la recorrería este móvil.

Estas líneas de fuerza pueden materializarse por experimentos análogos a los de los fantasmas magnéticos. Por ejemplo, péganse a una lámina de vidrio muy seca, trozos de hojas de estaño que formen conductores aislados. Se electrizan unos trozos, poniéndolos en comunicación con focos de electricidad (polos de una máquina eléctrica, por ejemplo); los otros, que se dejan en estado neutro, sométense a la influencia de los primeros. Si se dejan caer, de cierta altura, cerdas de cepillo, cortadas en fragmentos muy menudos, se las ve que se colocan siguiendo líneas continuas dirigidas a lo largo de las líneas de fuerza (fig. 904).

La explicación de este fenómeno es análoga a la de los fantasmas magnéticos. Cada fragmento dieléctrico se polariza (903) y se somete, en el campo eléctrico, a dos fuerzas paralelas de sentido contrario, aplicadas a sus extremos y en la dirección del campo eléctrico; luego se coloca en equilibrio en esta dirección.

906. Dirección y sentido de un campo eléctrico en las inmediaciones de un conductor electrizado.

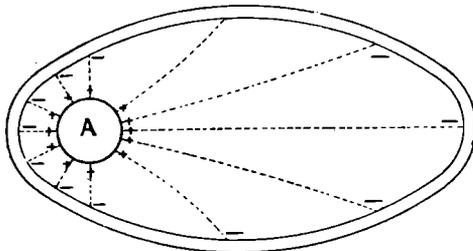


Fig. 905.

— El experimento de los fantasmas eléctricos indica que las líneas de fuerza abandonan normalmente los conductores. De donde se deduce que cuando un conductor se halla en equilibrio eléctrico, la dirección del campo en los puntos infinitamente próximos a la superficie es normal a élas.

Sentido del campo. — En las inmediaciones de un conductor cargado positivamente, el campo se dirige hacia el exterior; puesto que el con-

ductor rechaza la electricidad positiva. En las inmediaciones de un conductor cargado negativamente, al contrario, se dirige hacia el interior. Dícese, en este caso, que las líneas de fuerza parten de los conductores electrizados positivamente (fig. 904) y entran en los electrizados negativamente. Recíprocamente, todos los puntos de un conductor de donde parten las líneas de fuerza están cargados positivamente; ya que esto significa que el conductor rechaza una carga positiva. Todos los puntos adonde llegan las líneas están cargados negativamente.

Esto es lo que ocurre en la influencia eléctrica. La figura 905 indica las líneas de fuerza del campo producido por un conductor A, cargado positivamente y colocado en un recinto conductor. La figura 906 representa el caso en que un conductor aislado B, se halla situado en el recinto.

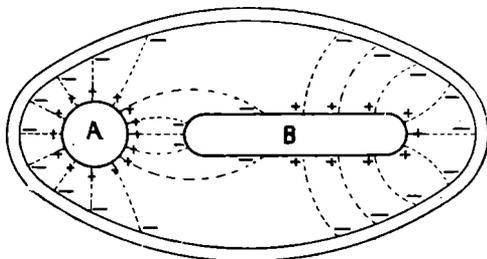


Fig. 906.

907. Estudio teórico del campo en un punto infinitamente próximo a la superficie de un conductor. — 1º *Intensidad del campo producido por un plano indefinido cargado uniformemente de electricidad.* — Sea P (fig. 907) un plano en que se halla repartida, uniformemente, la electricidad, positiva, por ejemplo, y sea Σ la densidad superficial constante en todos los puntos del plano. Supondremos a Σ evaluada en unidades de masa eléctrica por cm. ². Sea M un punto en que se encuentre la unidad de masa eléctrica positiva. Consideremos un elemento de superficie infinitamente pequeño s . Está cargado de una cantidad de electricidad Σs y ejerce, en M, una fuerza $\varphi = \frac{\Sigma s}{r^2}$, designando por r la distancia de M a s . La componente f de esta fuerza que sigue la perpendicular al plano es:

$$f = \varphi \cos. \alpha, \quad \text{o} \quad f = \Sigma \frac{s \cos. \alpha}{r^2},$$

designando por α el ángulo de sM con PM . Pero $s \cos. \alpha$ es el área de la sección recta trazada en s del cono elemental Ms , y $\frac{s \cos. \alpha}{r^2}$ es el área de la sección recta del mismo cono por un plano situado en la unidad de distancia de M. Se puede tomar, en vez de ella, el área ω que el cono Ms corta en una esfera de radio 1, descrita desde M como centro, con la unidad de longitud por radio.

Consideremos el conjunto de las superficies tales como s que constituyen el plano, y efectuemos la suma F (fig. 908) de las componentes normales tales como f .

Esta suma es igual a la densidad superficial Σ

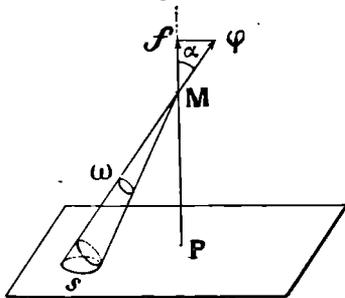


Fig. 907.

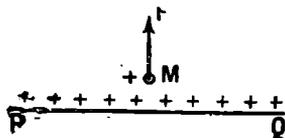


Fig. 908.

multiplicada por la suma de las áreas de la índole de ω . Pero esta última suma es igual a la superficie de una semiesfera de radio igual a la unidad, es decir a 2π . Luego

$$F = 2\pi\Sigma.$$

Esta fuerza F no es sino el campo producido por la capa plana, porque, por razón de simetría, el campo es normal al plano.

2º *Campo en las inmediaciones de un conductor.* — Consideremos un conductor electrizado positivamente, y sea M (fig. 909) un punto cargado de la unidad de masa eléctrica positiva e infinitamente próximo al conductor. El elemento de superficie AB que rodea a M obra evidentemente sobre él como lo haría un plano indefinido. Ejerce, en M , un campo $2\pi\Sigma$ dirigido hacia el exterior del conductor y normalmente a su superficie. Ahora bien, si se recorre AB de modo a llegar al punto M' , en el interior del conductor, el campo se anula (901). Pero la acción de los puntos del conductor distintos de AB no cambia y la de AB sólo cambia de sentido. Es, pues, preciso que la fuerza ejercida, ya en M , ya en M' , por el conjunto del conductor, fuera de AB , sea también una fuerza $2\pi\Sigma$, dirigida hacia el exterior y normal a la superficie AB . Los dos campos producidos por AB y por el resto del conductor se suman en M y el campo resultante, que es normal a la superficie del conductor, tiene una intensidad

$$F = 4\pi\Sigma,$$

Del mismo modo se estudiaría el caso en que el conductor esté cargado negativamente; entonces, el campo en M se dirige hacia el interior.

OBSERVACIÓN. — Sea σ la densidad expresada en culombios por cm^2 . Puesto que un culombio vale 3×10^9 unidades electroestáticas de cantidad de electricidad, tendremos $\Sigma = \sigma \times 3 \times 10^9$ y, por consiguiente :

$$F = 4\pi\sigma \times 3 \times 10^9.$$

908. **Valor de la tensión eléctrica en un punto de la superficie de un conductor.** — Sea s un elemento de superficie AB del conductor (fig. 909). Está cargado de una cantidad de electricidad Σs , y, según lo que precede, se halla en un campo producido por el resto del conductor y cuya intensidad es $2\pi\Sigma$. La fuerza a que está sometido es, pues, normal a AB , como el campo producido por el resto del conductor, y se expresa por

$$F' = 2\pi\Sigma \times \Sigma s = 2\pi\Sigma^2 s.$$

La tensión T es igual a $\frac{F'}{s}$ (891), luego vale

$$T = 2\pi\Sigma^2.$$

OBSERVACIÓN. — Evaluando la densidad superficial en culombios por cm^2 , tendremos :

$$T = 2\pi\sigma^2 \times 9 \times 10^{18}.$$

909. **Trabajo eléctrico.** — Cuando se cambia de lugar un cuerpo electrizado en un campo eléctrico, está sujeto a fuerzas que, durante el movimiento, ejecutan un trabajo positivo o negativo. Supongamos al cuerpo muy pequeño y poco cargado para que sus movimientos no acarreen, por fenómenos de influencia, ninguna variación en la distribución de las cargas eléctricas del campo. En estas condiciones, el principio de la conservación de la energía nos permite afirmar que, cuando se mueve el punto electrizado entre dos puntos A y B del campo, el trabajo de la fuerza eléctrica que se le aplica en cada punto de su recorrido, no depende del camino seguido.

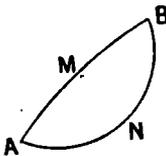


Fig. 910.

En efecto, imaginemos que, siguiendo una curva AMB (fig. 910), la fuerza eléctrica ejecute un trabajo positivo T , y que, siguiendo ANB , ejecute un trabajo $T' < T$. Observemos primero que si se mueve el punto electrizado en sentido inverso siguiendo BNA , como sólo se cambia la dirección del movimiento, el trabajo será $-T'$. Hagamos entonces recorrer al punto electrizado el ciclo cerrado $AMBNA$. El trabajo total será $T - T'$ que es positivo, puesto que T' es inferior a T . Como se puede repetir este movimiento las veces que se quiera, así podremos obtener, sin gasto correspondiente, una cantidad cualquiera de trabajo; lo cual está en contradicción con el principio de la conservación de la energía. Luego es preciso que sea $T' = T$.

Movimiento siguiendo la superficie de un conductor. — Si se mueve un punto electrizado manteniéndole a una distancia infinitamente pequeña de un conductor, como la fuerza es constantemente normal al movimiento, el trabajo eléctrico es nulo.

Consecuencias. — 1ª El trabajo eléctrico ejecutado por el movimiento de un punto electrizado, que va del punto A del campo (fig. 911) al punto de la superficie de cualquier conductor no depende de la posición de este último punto en la superficie.

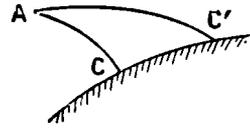


Fig. 911.

Sea, en efecto, T el trabajo eléctrico al mover el punto electrizado de A a C. Para ir de A a C' podemos seguir la trayectoria ACC' sin cambiar el trabajo. Pero de C a C' el trabajo es nulo, puesto que la fuerza es normal al movimiento. Por consiguiente, el trabajo, cuando se lleva el punto electrizado de A a C', es el mismo, T, que cuando se le lleva de A a C.

2ª Con igual facilidad se demostraría que, cuando se mueve un punto electrizado de cualquier punto de la superficie de un conductor a un punto de la superficie de otro conductor, el trabajo de la fuerza eléctrica es independiente de la posición de estos puntos en las superficies.

POTENCIAL ELÉCTRICO.

910. Diferencia de potencial entre dos conductores. — Potencial de un conductor. — Ya hemos visto (770) los experimentos por los cuales puede demostrarse que, entre dos conductores, existe una diferencia de potenciales eléctricos. También hemos visto de qué modo puede definirse, ya sea experimentalmente (771), ya teóricamente (772), la magnitud de la diferencia de potenciales, que existe entre dos conductores.

Diferencia de potenciales entre un conductor y el suelo. — Potencial de un conductor. — Si se pone en comunicación con el suelo, la caja de un electroscopio *, y las hojas de oro, con un conductor A (fig. 912), la desviación de éstas indicará si existe diferencia de potenciales entre A y el suelo.

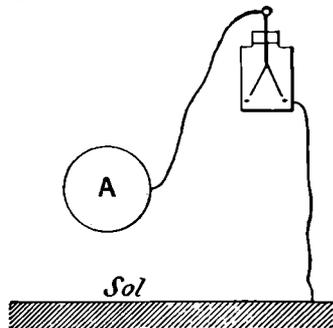


Fig. 912.

A veces se dice que el potencial del suelo es nulo. Por otra parte la utilidad de este convenio no ofrece gran importancia; puesto que los fenómenos eléctricos dependen únicamente de las diferencias de potenciales de los conductores que entran en juego**. *De todos modos, en*

* Esto se efectúa fácilmente, uniendo, mediante un alambre, la caja del electroscopio a las cañerías de gas o de agua.

** Tomar el potencial del suelo por cero es un convenio de la misma naturaleza que la de contar las altitudes sobre el nivel del mar. Desde este punto de vista, podría considerarse el potencial, como una *altitud eléctrica*.

virtud de esto, podemos llamar *potencial del conductor*, a la diferencia de potenciales entre el cuerpo y el suelo.

Tomemos, por ejemplo, una pila P (fig. 913) de 10 voltios, y pongamos su polo negativo en comunicación con el suelo : así, se halla en el potencial cero, y el potencial del polo positivo es $+10$ voltios.

Si, por el contrario, se pone el polo positivo de la pila en comuni-

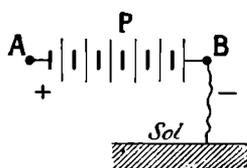


Fig. 913.

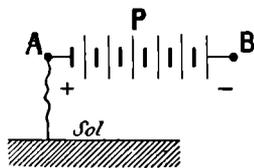


Fig. 914.

cación con el suelo (fig. 914), entonces, el polo negativo estará en el potencial -10 voltios; puesto que siempre presenta la misma diferencia de potenciales con el positivo.

911. Constancia del potencial en los diversos puntos de un conductor. — Supongamos un electroscopio cuya caja metálica comunique

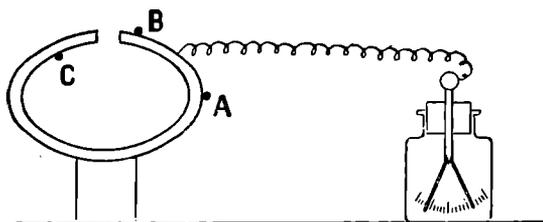


Fig. 915.

con el suelo y un conductor electrizado de forma cualquiera, por ejemplo, el conductor hueco ovalado de la figura 915. Pongamos un punto cualquiera de este conductor, en comunicación con los panes de oro del electroscopio, por medio de un alambre

largo y delgado : y, ya sea este punto el punto A, en que la densidad eléctrica es máxima, ya sea B, en que es mínima, o bien C, en que es nula, se observará que *la desviación de las hojas es la misma*.

Estos experimentos dan el mismo resultado cuando el conductor, en vez de hallarse aislado de cualquier otro cuerpo electrizado, está sometido a la influencia de un cuerpo electrizado. Si, por ejemplo, se ponen las hojas de oro en comunicación con los diversos puntos de un conductor CD (fig. 893), sometido a la influencia de un cuerpo A electrizado positivamente, su desviación es la misma, sea cual fuere este punto : ora C, en que la carga es positiva, ora D, en que es negativa, o bien M, en donde es nula.

De estos diversos experimentos, se deduce que :

El potencial de un conductor en equilibrio eléctrico es el mismo en todos sus puntos, sean cuales fueren las condiciones en que se coloque.

OBSERVACIONES. — 1ª Por estos experimentos, se ve también, que el electroscopio unido a un punto de un conductor por un alambre largo y delgado, da una indicación que no está en relación con la densidad eléctrica en el punto considerado.

2ª Si se ponen dos conductores en comunicación metálica y se realiza el equilibrio eléctrico (931), los dos conductores toman el mismo potencial, porque entre ambos no constituyen sino un solo conductor. Además, esto puede comprobarse fácilmente con un electroscopio.

3ª Si un conductor comunica con el suelo, lo mismo que la caja del electroscopio, la desviación de los panes de éste es nula al ponerlos en comunicación con el conductor, aunque se cargue éste por la influencia de un cuerpo electrizado cercano. La diferencia de potenciales entre el conductor y el suelo es, en efecto, nula en estas condiciones.

912. **Unidad electroestática de diferencia de potenciales.** — Ya sabemos que si se pasa una cantidad de electricidad q de un conductor B a otro conductor A y este paso desarrolla una cantidad \mathcal{E} de trabajo o de cualquier energía, la diferencia de potenciales $V_A - V_B$ (o V) que existe entre los dos conductores se expresa en voltios, por el cociente $\frac{\mathcal{E}}{q}$ (772) estando \mathcal{E} expresado en julios y q , en culombios*.

Si el trabajo \mathcal{E} se expresa en ergamias y la cantidad de electricidad q , en unidades electroestáticas (884) la diferencia de potenciales V estará expresada en *unidades electroestáticas de diferencia de potenciales*. De modo que :

*La unidad electroestática de diferencia de potenciales es la diferencia de potenciales que existe entre dos conductores tales que el paso de una unidad electroestática de cantidad de electricidad de un cuerpo a otro produzca o exija un trabajo de una ergamia**.*

En ambos casos se puede aplicar la fórmula $\mathcal{E} = qV$.

\mathcal{E} se expresa en julios si q está expresada en culombios y V en voltios. Si q y V están expresadas en unidades electroestáticas, \mathcal{E} se expresará en ergamias.

Relación entre el voltio y la unidad electroestática de diferencia de potenciales. — Sea V el valor del voltio en unidades electroestáticas. Cuando un culombio o 3×10^9 unidades electroestáticas (885), se mueve entre dos cuerpos cuya diferencia de potenciales es un voltio, o V unidades electroestáticas, el trabajo desarrollado es un julio o 10^7 ergamias. Luego

$$10^7 = V \times 3 \times 10^9, \quad \text{de donde} \quad V = \frac{1}{300}.$$

Por lo tanto, el voltio vale $\frac{1}{300}$ de unidad electroestática de diferencia de potenciales; o, en otros términos, *la unidad electroestática de diferencia de potenciales vale 300 voltios.*

913. **Variaciones del potencial de un conductor en la influencia electroestática.** — Teórica y experimentalmente, se establecen las siguientes leyes :

1ª *La aproximación de un cuerpo cargado positivamente, o el alejamiento de un cuerpo cargado negativamente, aumentan el potencial de un conductor.*

2ª *La aproximación de un cuerpo cargado negativamente, o el alejamiento de un cuerpo cargado positivamente, disminuyen el potencial de un conductor.*

En efecto, pongamos en comunicación con un electrómetro cuya caja esté en el suelo, un conductor aislado P (fig. 916) cualquiera, que, primeramente, supondremos en el potencial cero. Acercuemos un cuerpo A, conductor o aislador, cargado positivamente : en la desviación del elec-

* En caso de que el paso de electricidad de un conductor a otro no modifique la diferencia de potenciales que existía primitivamente entre ellos.

** Con la misma reserva que en el caso anterior.

trómetro, veremos que el potencial de P se vuelve positivo y aumenta a medida que se acerca A. Del mismo modo, si se acerca un cuerpo cargado negativamente, el potencial de P se vuelve negativo y aumenta en valor absoluto cuando se acerca A; luego disminuye en valor algébrico.

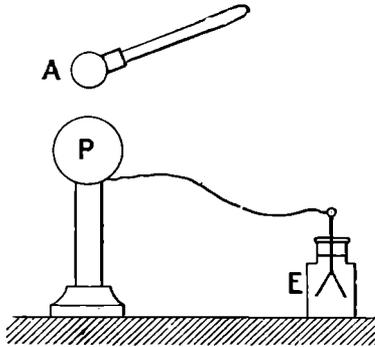


Fig. 916.

Si el conductor P se halla ya cargado positivamente (potencial inicial positivo), al acercar A, cargado positivamente, aumenta la desviación de las hojas, luego aumenta el potencial de P. Si A está cargado negativamente, las hojas se acercan cuando se aproxima A a P, luego disminuye el potencial de P. Para distancia muy pequeña, este potencial puede llegar a anularse y, en este caso, si se la acerca aún más a A, se vuelve negativo.

Todas las particularidades de estos fenómenos se reproducen en sentido inverso cuando se aleja A de P, después de haberlo acercado.

Análogos experimentos pueden efectuarse si P está cargado negativamente y comprueban el enunciado precedente. Sobre todo, cuando se acerca A, cargado positivamente, las hojas de oro se aproximan, por consiguiente el potencial negativo disminuye en valor absoluto, luego aumenta en valor algébrico. Si A está suficientemente cerca, el potencial P puede volverse nulo, después positivo, cuando se acerca más A (las hojas divergen otra vez, cargadas positivamente).

914. **Diferencia de potenciales entre dos puntos de un campo eléctrico.** — *Llámanse diferencia de potenciales entre dos puntos A y B de un campo eléctrico el trabajo de la fuerza eléctrica cuando se mueve de A a B la unidad eléctrica positiva*.*

En caso de que los dos potenciales considerados pertenezcan a dos conductores, esta definición da, para la diferencia de potenciales entre los dos conductores, el mismo resultado que la ya dada (772).

En efecto, según esta nueva definición, para encontrar la diferencia de potenciales entre dos conductores, es preciso evaluar el trabajo de la fuerza eléctrica cuando se transporta la unidad de electricidad positiva de un punto de uno de los conductores a un punto del otro. Por otra parte, este trabajo es independiente de los puntos considerados de las superficies de los conductores (909). Entre la definición actual y la ya dada (772) la diferencia consiste en que suponíamos el transporte de la electricidad efectuado por una corriente, mientras que, aquí, lo suponemos efectuado por un cuerpo que se mueve en el campo eléctrico. En virtud del principio de la conservación de la energía, debe ser la misma la energía empleada sea cual fuere el medio de transporte.

OBSERVACIONES. — La diferencia de potenciales entre dos puntos de un campo se mide, ya en voltios, ya en unidades electrostáticas. La fórmula $\zeta = qV$ se aplica al transporte de la electricidad entre dos puntos cualesquiera de un campo lo mismo que al transporte entre dos conductores.

Finalmente, si se conviene en llamar *potencial cero* al potencial del suelo, la diferencia de potenciales entre un punto del campo y un punto infinitamente próximo al suelo se llama potencial del punto considerado del campo.

* Hay que suponer que esta unidad de electricidad no produce ningún fenómeno de influencia.

915. **Regiones en que el potencial es constante.** — Si en todos los puntos de una región es constante el potencial, la intensidad del campo es nula en todos estos puntos.

En efecto, el trabajo de la fuerza eléctrica debe ser nulo cuando se mueve un punto electrizado entre dos puntos cualesquiera de esta región; luego tiene que ser nula la fuerza eléctrica.

Inversamente, si el campo es nulo en todos los puntos de un espacio cualquiera, el potencial es constante en este espacio; puesto que el trabajo es nulo cuando se mueve un punto electrizado positivamente entre dos puntos cualesquiera de este espacio.

El experimento preciso de Faraday (901) nos ha hecho ver que el campo eléctrico es nulo en todos los puntos del interior de un conductor macizo o hueco. Por consiguiente, el potencial tiene un valor constante.

916. **Superficies equipotenciales.** — En un campo eléctrico existe evidentemente toda una serie de puntos que tienen el mismo potencial V . Estos puntos forman una superficie que se llama *superficie equipotencial*. A otro valor V' del potencial corresponderá otra superficie equipotencial.

En cada punto M de una de esas superficies (fig. 917), la línea de fuerza que pasa por este punto es normal a la superficie. En efecto, movamos un punto electrizado a partir de M de la superficie en cualquier dirección: el trabajo de la fuerza es nulo puesto que el potencial no varía. Como esta fuerza no es nula, es por consiguiente normal a todas las líneas trazadas en la superficie que pasen por M . Luego es normal en M . Lo propio ocurre con la línea de fuerza tangente.

Por esta razón, a las superficies equipotenciales se les da el nombre de *superficies de nivel eléctrico*. En efecto, son análogas a las superficies de nivel en el caso de la gravedad, que poseen la propiedad de ser, en todos los puntos, normales a la dirección de la gravedad, y tales, por consiguiente, que si se mueve un punto material en una de ellas, el trabajo de la gravedad es nulo.

La superficie de un conductor siempre es una superficie equipotencial. Además, ya hemos visto que el campo es normal a esta superficie.

917. **Expresión de la fuerza en función del potencial.** — Consideremos dos superficies equipotenciales, V, V' (fig. 918) tan próximas que se pueda considerar el campo como constante entre los puntos A, A' donde se encuentran diversas líneas de fuerza con esas superficies. Sea e la distancia AA' , H la intensidad del campo entre estos dos puntos. Cuando se mueve la unidad de electricidad positiva entre A y A' , como la fuerza está constantemente en la dirección del movimiento, su trabajo es He . Esta es la expresión de la diferencia de potenciales entre A y A' . Por consiguiente se tiene :

$$V - V' = He.$$

De donde

$$H = \frac{V - V'}{e}.$$

Como, en un campo no uniforme, no se puede considerar como constante la intensidad más que entre dos puntos infinitamente inmediatos, se tiene en realidad .

$$H = \lim \frac{V - V'}{e},$$

cuando e tiende hacia cero.

Consecuencia. — Si en otra región del campo, entre B y B' por ejemplo, las superficies equipotenciales V, V' están más separadas que entre A y B , la intensidad del campo es más pequeña. En efecto, sea e' la distancia AB' , H' el campo entre esos dos puntos :

$$H' = \frac{V - V'}{e'}.$$

Pero $e' > e$, luego $H' < H$.

Por consiguiente, conociendo las superficies equipotenciales se puede tener en cada punto la dirección y la intensidad del campo. Si se suponen trazadas esas superficies de modo que correspondan a valores del potencial regularmente crecientes, la simple

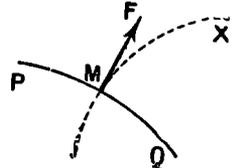


Fig. 917.

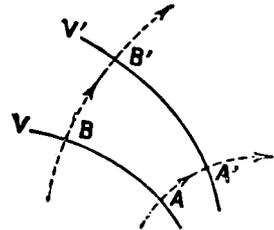


Fig. 918.

vista de la figura podrá indicar la intensidad del campo. Cuanto más se acerquen en una región las superficies equipotenciales, más intenso será ahí el campo.

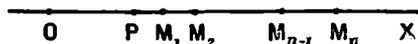


Fig. 919.

918. Cálculo del potencial. — 1º Caso de un solo punto electrizado. — Supongamos primero que el campo esté formado por un solo punto O electrizado, cargado de una cantidad q de electricidad positiva por ejemplo (fig. 919). Se puede demostrar que el potencial en un punto cualquiera P, situado a una distancia r del punto O, puede ser calculado por la fórmula siguiente :

$$V = \frac{q}{r}.$$

En efecto, tomemos como punto de potencial nulo el punto al infinito en la dirección OP. Ya sabemos que se puede hacer sin inconveniente puesto que los diversos fenómenos eléctricos sólo dependen de las diferencias de potenciales. El potencial de P es entonces igual al trabajo de la fuerza eléctrica cuando se lleva la unidad de electricidad positiva de P a lo infinito por un camino cualquiera, PX por ejemplo. Calculemos primero el trabajo para el movimiento PM_n y dividámos ese segmento en n partes iguales $PM_1, M_1M_2, \dots, M_{n-1}M_n$ bastante pequeñas para que en cada una de ellas pueda ser considerada la fuerza como constante. Sean, $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n$ las distancias al punto O de los puntos $M_1, M_2, \dots, M_{n-1}, M_n$. En el intervalo de P a M_1 , la fuerza varía del valor $\frac{q}{r^2}$ al de $\frac{q}{x_1^2}$. Podemos considerarle constante e igual a $\frac{q}{rx_1}$. Del mismo modo, entre M_1 y M_2 le daremos el valor $\frac{q}{x_1x_2}$. Los trabajos de estas fuerzas serán :

$$\text{De P a } M_1 : \quad \frac{q}{rx_1} (x_1 - r) = q \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{x_1} \right).$$

$$\text{De } M_1 \text{ a } M_2 : \quad \frac{q}{x_1x_2} (x_2 - x_1) = q \left(\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right).$$

$$\text{De } M_{n-1} \text{ a } M_n : \quad \frac{q}{x_{n-1}x_n} (x_n - x_{n-1}) = q \left(\frac{1}{x_{n-1}} - \frac{1}{x_n} \right).$$

Efectuando la suma, tenemos

$$\mathcal{C} = q \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{x_n} \right),$$

en que \mathcal{C} representa el trabajo para el movimiento PM_n . Si M_n se aleja a lo infinito $\frac{1}{x_n} = 0$, el trabajo \mathcal{C} viene a ser entonces el potencial en P; por consiguiente se tiene

$$V = \frac{q}{r}.$$

Caso general. — Si el campo eléctrico está formado por un número cualquiera de puntos electrizados, ya separados, ya reunidos en dieléctricos o en las superficies de conductores, para calcular el potencial en un punto basta hacer la suma de las cantidades $\frac{q}{r}$ relativas a cada punto electrizado.



Fig. 920.

Sean por ejemplo tres puntos O_1, O_2, O_3 (fig. 920) cargados respectivamente de cantidades de electricidades positivas o negativas q_1, q_2, q_3 . Busquemos el potencial en un punto P, cuyas distancias a los puntos O_1, O_2, O_3 sean respectivamente r_1, r_2, r_3 . El potencial en P tiene por valor :

$$V = \frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3}, \quad \text{que se marca} \quad \Sigma \frac{q}{r}.$$

Esta es la suma de los potenciales que en ese punto daría cada una de las cargas q_1, q_2, q_3 si estuviera sola.

En efecto, movamos la unidad de electricidad del punto P a lo infinito por un camino cualquiera. En cada instante, la fuerza que actúa sobre él es la resultante de las acciones

de los puntos O_1, O_2, O_3 . El trabajo de esta resultante, que es el potencial que se busca, es igual a la suma de los trabajos de los componentes. Ahora bien, ya hemos visto antes que esos trabajos son respectivamente $\frac{q_1}{r_1}, \frac{q_2}{r_2}, \frac{q_3}{r_3}$; luego V es la suma de estas cantidades.

919. **Cálculo del potencial de un conductor.** — Supongamos primero que el conductor está aislado en el espacio. Como no existen más cargas que las de los diferentes puntos de su superficie, basta para tener el potencial de un punto cualquiera del cuerpo, es decir el potencial de todo el cuerpo, formar la suma $\sum \frac{q}{r}$ donde q representa la carga de un elemento de superficie, r su distancia al punto considerado.

Caso general. — En el caso de que no esté solo el cuerpo considerado, para calcular su potencial es preciso hacer que entren en la suma $\sum \frac{q}{r}$, al lado de los términos relativos a su propia carga, los relativos a las cargas de los conductores y de los dieléctricos que le rodean. Además, sean cuales fueren la posición y la magnitud de estas cargas, los fenómenos de influencia acarrearán al conductor considerado una distribución eléctrica tal que el potencial sea constante en el interior del cuerpo, y, por consiguiente, que el campo eléctrico sea ahí nulo, como lo prueban los experimentos (901).

CAPÍTULO VI

MÁQUINAS ELÉCTRICAS

920. **Definición.** — **Electróforo.** — Se llaman *máquinas eléctricas* aparatos capaces de producir de modo continuo notables cantidades de electricidad a elevado potencial. La máquina eléctrica más sencilla es el electróforo de Volta.

El aparato consta de una torta de resina B (fig. 921), vaciada en un molde conductor y de un disco de madera A, recubierto de una hoja de estaño y provisto de un mango aislador. Conviene que la resina esté mezclada con pez y es preciso que la superficie de la torta sea lisa.

Empiézase por secar la resina calentádola a fuego lento, luego, se frota la torta con una bayeta, o piel de gato, lo cual la electriza negativamente*. Si, entonces, se coloca sobre la resina el disco de madera cubierto de estaño, aquella obra por influencia sobre éste, que se electriza positivamente en la superficie que toca a la resina y negativamente en

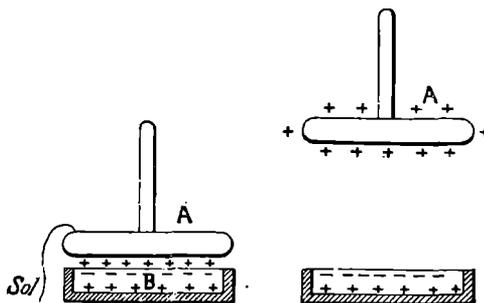


Fig. 921.

* Por influencia, el molde conductor se carga positivamente; puesto que está en comunicación con el suelo; la presencia de esta carga positiva conserva la electrización de la torta.

la otra superficie. Tocando, luego, la hoja de estaño con el dedo, se sustrae la electricidad negativa y el disco queda electrizado positivamente; pero se halla en el potencial cero. Si se levanta, aumenta su

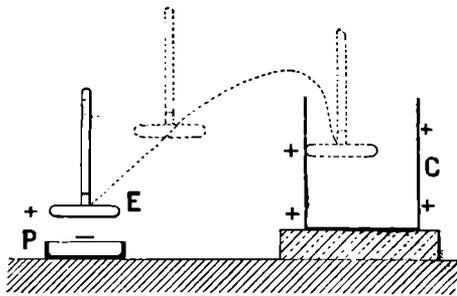


Fig. 922.

potencial (porque se aleja de la carga negativa de la resina), su carga positiva espárcese por toda su superficie. Si se acerca el dedo, puede hacerse brotar una chispa. Esta chispa basta para producir detonación, en el eudiómetro, de las mezclas gaseosas y operar síntesis químicas.

También se puede, mediante un electrofórico, cargar un conductor con una cantidad de electricidad

tan grande como se quiera; basta introducir el platillo A en el interior de este conductor (un cilindro, por ejemplo) y hacerle tocar la superficie interna (fig. 922). Se puede volver a empezar indefinidamente y, cada vez, aumentar en la misma cantidad la carga del conductor*.

921. Máquinas eléctricas de influencia. — Principio. — Replenisher. — El electrofórico tiene necesariamente una marcha discontinua y, por lo

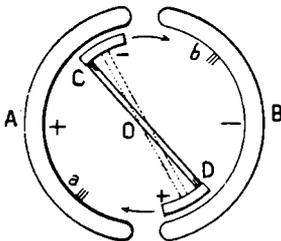


Fig. 923.

tanto, poco cómoda. Se han inventado numerosas máquinas que funcionan de modo continuo por medio de un movimiento de rotación continuo. El principio de la producción de electricidad es, en ellas, algo diferente del principio del electrofórico; es el de una pequeña máquina, el *replenisher*, inventada por Kelvin.

Este aparato se compone de dos piezas metálicas aisladas A y B (fig. 923), en forma de semicilindros; otras dos piezas metálicas C y D, formadas por dos porciones de cilindro del mismo eje que A y B, se hallan unidas por una armadura aisladora y se les puede imprimir un movimiento de rotación rápido, alrededor del eje O. En la posición CD, se hallan unidas eléctricamente por un conductor diametral CD fijo, provisto de escobillas metálicas que frotan contra sus caras internas. Admitamos que A esté cargado positivamente y B negativamente; para esto, basta que presenten una diferencia de potenciales, por pequeña que sea, lo cual ocurre siempre. C se carga negativamente por influencia, y D positivamente. Como el movimiento de rotación se produce en el sentido de la flecha, C va al contacto de una escobilla metálica b unida a B y cede su carga a este conductor, en cuyo interior se halla. Al mismo tiempo, D cede su carga positiva a A, por medio de la escobilla a. Luego las cargas positiva de A y negativa de B aumentan.

* Solo está limitado por las pérdidas de electricidad debidas a la falta de aislamiento y al viento eléctrico, cuando el potencial se hace muy grande.

Quando las piezas movibles vuelven a CD, la influencia es mucho mayor que antes y así sucesivamente. Si no hubiera ninguna pérdida, las cargas tomadas por C y D, y cedidas inmediatamente después, a B y A, crecerían en progresión geométrica, a cada media vuelta; mientras que en el electróforo, las cargas recogidas en cada maniobra continúan siendo iguales. El rápido aumento de las cargas de A y B y, por consiguiente, de su diferencia de potenciales sólo está limitado por las pérdidas de carga y las chispas que se producen entre A y B en cuanto se vuelve muy grande su diferencia de potenciales.

922. **Características de las máquinas eléctricas.** — Las demás máquinas de influencia, tales como las de Holtz, Wimshurst, etc., son más complicadas. Poseen platillos dieléctricos en donde se desarrollan fenómenos mal conocidos aún; por lo tanto no puede establecerse una teoría completamente satisfactoria de su funcionamiento. En todas estas máquinas hay dos polos que se cargan, uno, de electricidad positiva y el otro, de una cantidad equivalente de electricidad negativa. Los caracteres esenciales de una máquina son la *diferencia máxima de potenciales* que establece entre los dos polos y el *rendimiento*.

La diferencia de potenciales máxima se mide por la *longitud de la chispa máxima* que puede proporcionar la máquina (la chispa puede llegar a 15 cm., lo cual corresponde a 60 000 voltios); depende del aislamiento de la máquina y también de su *rendimiento*.

El *rendimiento* de una máquina es la *cantidad de electricidad que puede proporcionar por segundo*. Siempre es una fracción muy pequeña de culombio (algunas diezmilésimas). Luego si se unen los dos polos por un alambre metálico, no hay sino una corriente eléctrica muy poco intensa, capaz únicamente de actuar sobre un galvanómetro sensible. Es evidente que una máquina de gran rendimiento, que repara más pronto la pérdida debida a la falta de aislamiento, producirá, a igualdad de aislamiento, una diferencia de potenciales más elevada que una máquina de poco rendimiento.

923. **Máquina de Wimshurst.** — Esta máquina, ya antigua, se compone (fig. 924) de dos platillos de cristal o de ebonita que llevan cada uno un mismo número par de sectores metálicos pegados cerca de la circunferencia.

Estos dos platillos reciben el movimiento de un mismo árbol accionado por un manubrio M, mediante poleas y correas, una de las cuales únicamente es cruzada*; de manera que las rotaciones de los dos platillos se efectúan en sentido contrario. Frente a cada uno de ellos hay conductores diametrales ambos inclinados 45° sobre el horizonte, pero en sentidos contrarios, de modo que resulten perpendiculares entre sí. Están en comunicación eléctrica con el suelo. Sus extremos están provistos de pequeños pinceles metálicos llamados *escobas* o *cepillos*, que van a tocar por turno los sectores metálicos.

Actualmente, se construyen máquinas sin sectores metálicos

* Por un error, so ha representado cruzada la correa de atrás.

(máquinas Bonetti) que tienen mayor rendimiento que las máquinas de sectores. Pero mientras que éstas se cargan por sí mismas, no ocurre lo mismo con las que carecen de sectores: para que éstas produzcan electricidad, es menester hacer girar los platillos frotando contra uno de ellos el dedo muy seco o empapado en bisulfuro de estaño.

Funcionamiento. — Si se ponen en movimiento los platillos, vense

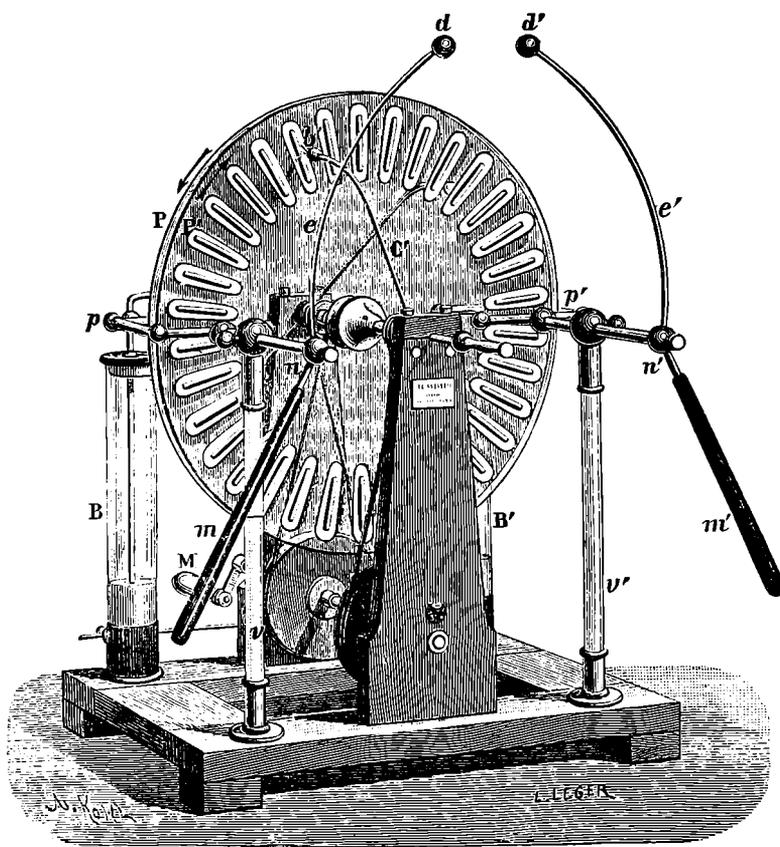


Fig. 924.

producirse las manifestaciones habituales en la oscuridad: resplandores, penachos luminosos, descargas entre los platillos; además se oye el pequeño chisporroteo característico.

Ahora se trata de recoger la electricidad producida. Con tal fin se disponen a derecha e izquierda horizontalmente peines a , a' , b , b' , (fig. 925) que abarcan los dos platillos en toda la longitud de los sectores metálicos: son piezas metálicas en forma de herradura, provistas en su interior de puntas o simplemente de láminas delgadas. En su rotación, los platillos llegan entre los peines, cargados positivamente por un lado y negativamente por otro. Los platillos positivos obran por influencia sobre los peines; en las puntas o en las láminas, produce electricidad negativa que se esparce por el viento eléctrico y

neutraliza la carga de los platillos; al mismo tiempo, la carga positiva desarrollada por la influencia, se pone en el conductor A en comunicación con aa' .

Del mismo modo, los platillos negativos obran sobre el conductor bb' B; por bb' se esparrsa electricidad positiva que neutraliza la carga de los platillos; mientras que en B se acumula electricidad negativa.

A y B forman los dos polos de la máquina. Cuando ésta funciona, brota entre ellos un flujo continuo de chispas. Cuando se los pone en

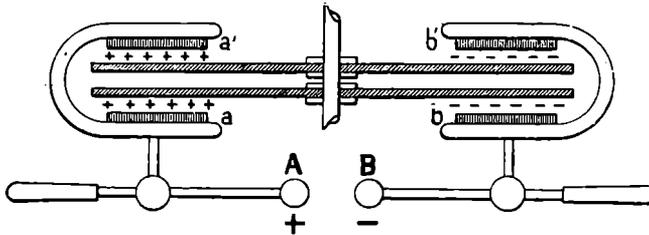


Fig. 925.

comunicación con los aparatos llamados condensadores (936) B y B' (fig. 924), por medio de vástagos de cobre que se pueden colocar o suprimir a voluntad, se obtienen chispas menos frecuentes; pero más brillantes y ruidosas.

También se construyen máquinas de Wimshurst de varios pares de platillos que se ponen en movimiento por un pequeño motor. Estas tienen un rendimiento considerable, comparable al de los grandes carretes de inducción.

924. **Máquina eléctrica de Holtz.** — La máquina de Holtz es la más antigua de las *Máquinas de influencia* propiamente dichas: Se compone de dos platillos de vidrio delgado de diámetros desiguales, dispuestos paralelamente (fig. 926), y distantes algunos milímetros uno de otro. El mayor AA se mantiene fijo por medio de cuatro garruchas de madera a , sostenidas por ejes y pies de vidrio. Delante del platillo A está el segundo, BB, de diámetro algo menor; encuéntrase fijo a un eje horizontal de vidrio, que pasa libremente por una abertura central practicada en el platillo grande. El platillo B es entero en toda su extensión, mientras que el A está agujereado en las dos extremidades de un mismo diámetro, por dos *ventanas*, F, F'. A lo largo del borde inferior de la ventana F, en la cara posterior del platillo, está pegada una banda de papel p (fig. 927), y en la anterior una lengüeta n de cartón delgado, unida con la banda p por una fina banda de papel, que pasa por encima del borde de la ventana. En la ventana F', el borde superior está análogamente provista de una banda de papel p' y de una lengüeta n' . Las bandas p, p' se llaman las *armaduras*. Los dos platillos, las armaduras, las lengüetas (sobre todo sus bordes) están cubiertos de una capa de barniz de goma laca.

Delante del platillo B, a la altura de las armaduras, se encuentran dos peines de cobre O, O' sostenidos por dos conductores del mismo metal C, C' (fig. 926). Estos sostienen en sus extremidades anteriores dos bolas bastante gruesas, atravesadas por dos vástagos de cobre terminados en otras dos bolas más pequeñas, r, r' , y provistas de mangos de ebonita K, K'. Estos vástagos pueden no sólo resbalar con frotamiento suave en las gruesas bolas, sino girar con ellas, de modo que se aproximen o se inclinen más o menos. La rotación del platillo B se obtiene por medio de un manubrio M y de una serie de poleas y de correas sin fin; su velocidad es de 12 a 15 vueltas por segundo próximamente: debe efectuarse en el sentido de las flechas, es decir, hacia las puntas de las lengüetas n, n' (fig. 927).

Funcionamiento. — Hay que empezar por *cargar* las armaduras pp' , es decir, por electrizarlas, una positiva y otra negativamente. Tómase una placa de ebonita, que se

electriza frotándola, sea con una piel de gato, sea con la mano; después se ponen en contacto las bolas r , r' , de modo que los dos conductores C , C' (fig. 928) no formen más

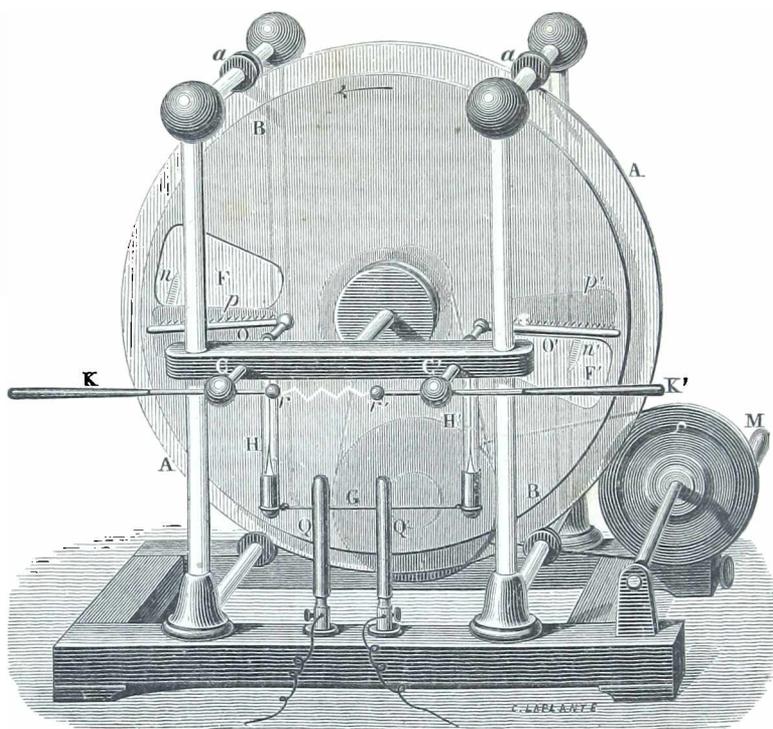


Fig. 926.

que uno. Acercando entonces hasta detrás de una de las armaduras, por ejemplo p (fig. 927), la placa de ebonita, que es negativa, se sustrae por la lengüeta n la electricidad positiva de la armadura, y se la carga de electricidad negativa. Esta carga induce a su vez, a través del platillo B , a medida que da vueltas, los conductores $OCC'O$

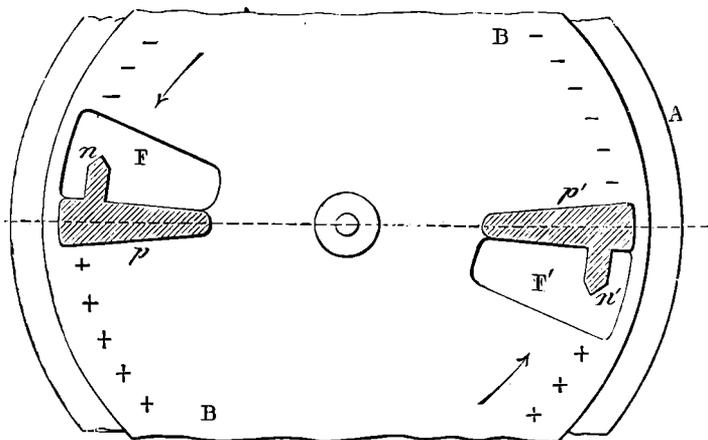


Fig. 927.

(fig. 928), y sustrae por el peine O la electricidad positiva, que se deposita en la cara anterior del platillo móvil, mientras que al mismo tiempo la electricidad negativa, pro-

ducida por la influencia sobre el peine O' , va a depositarse como la primera en la parte anterior del platillo B . Después las dos electricidades son arrastradas por la rotación del platillo, y al cabo de media revolución, todo el contorno inferior, desde p a F (fig. 927), queda electrizado positivamente, y su contorno superior, desde p' a F' negativamente. Ahora bien, como las dos electricidades contrarias, por debajo y por encima de la ventana F' , actúan en el mismo sentido por influencia sobre la armadura p' , n' , la parte p' se electriza positivamente, mientras que la negativa se desprende por la lengüeta n' y va a depositarse en la cara interna del platillo B , donde, por causa del escaso grueso de éste, neutraliza casi completamente la electricidad positiva depositada en la cara anterior.

Entonces están cargadas las dos armaduras, cosa que se sabe al oír un ruido característico. El mismo efecto que en F' se produce en F , sobre la armadura pn , es decir que las electricidades contrarias, por encima y por debajo de pn , actúan por influencia, y la carga negativa de la parte p aumenta, mientras que la electricidad positiva que se

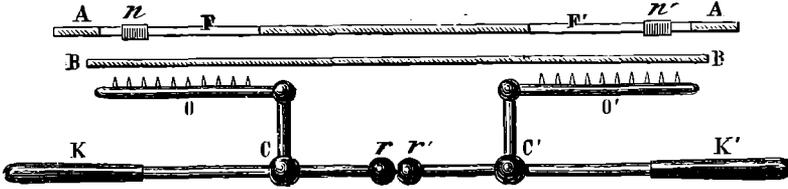


Fig. 928.

desprende por la lengüeta n va a neutralizar la electricidad negativa que va de F' hacia F ; y así sucesivamente hasta que la máquina alcanza un potencial máximo, con lo cual se establece el equilibrio entre todas sus partes. A partir de este momento, la rotación se limita a mantener el potencial constante *. Una vez cargada la máquina y retirada la placa de ebonita, se apartan las bolas r y r' , hasta una distancia que depende de la máquina, pero que puede alcanzarse fácilmente 15 a 20 centímetros: de una bola a otra salta continuamente un torrente de chispas (fig. 926) con tal que continúe el movimiento de rotación.

OBSERVACIONES. — 1ª. *Inversión de los polos.* — *Uso del conductor diametral.* — Si se separan demasiado las bolas r y r' , o si se da vuelta al platillo en sentido contrario, la máquina se descarga. A veces basta una sencilla variación de velocidad para ocasionar una *inversión* de los polos. Se ha tratado de evitar la inversión, sin lograrlo completamente, disponiendo un conductor diametral provisto de placas, que funciona como el conductor rr' de la máquina durante la carga.

2ª. *Uso de los condensadores.* — Con frecuencia se cuelgan de los conductores C , C' , dos condensadores, H , H' (fig. 926), que consisten en dos probetas de vidrio grueso, cuyas paredes interiores y exteriores están cubiertas por una hoja de estaño hasta la quinta parte de su altura. Cada probeta está cerrada por un tapón a través del cual pasa un vástago de cobre con garfio, que por un extremo comunica con la hoja de estaño interior, y suspendida por el otro de uno de los conductores. Exteriormente las dos hojas de estaño están en comunicación por medio de un conductor G .

925. *Máquinas de frotamiento.* — Los fenómenos de electrización por frotamiento han sido los primeros empleados en la construcción de máquinas de funcionamiento continuo que sólo tienen interés histórico. Tal es la antigua máquina de Ramsden que todavía existe en los gabinetes de Física. Su rendimiento era muy escaso a pesar de sus engorrosas dimensiones, y, en ella, el frotamiento absorbía en pura pérdida una cantidad considerable de trabajo mecánico.

Estas máquinas se fundaban en el principio siguiente. Un platillo de vidrio móvil alrededor de un eje horizontal pasaba entre dos frotadores que lo cargaban positivamente. Estos frotadores se hallaban en comunicación con el suelo y se desvanecía su electricidad negativa. Por otra parte, la sección del platillo cargada por el frotamiento, iba a pasar entre dos peines que comunicaban con un conductor aislado: de este modo, tal conductor cargábase positivamente, mientras que el platillo se descargaba por las puntas del peine **.

* En un aire perfectamente seco la máquina puede funcionar mucho tiempo sin que sea necesario cargarla de nuevo con la placa de ebonita.

** Para más detalles, véanse las anteriores ediciones de la *Física de Ganot-Maneuverier*.

CAPÍTULO VII

CAPACIDAD ELÉCTRICA. — CONDENSADORES

926. **Relación entre la carga de un conductor y su potencial.** — El experimento y la teoría demuestran la proposición siguiente :

Si un conductor se halla en un recinto conductor que lo envuelva por completo, su carga eléctrica es proporcional a la diferencia de potenciales entre él y el recinto.

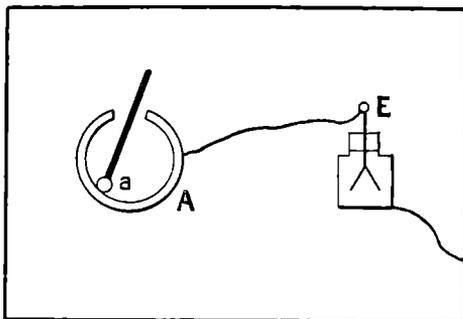


Fig. 929.

Si se trata de un conductor instalado en un salón, las paredes constituyen el recinto conductor. Como éstas comunican con el suelo, se considera su potencial como cero; de modo que podemos decir :

La carga de un conductor es proporcional a su potencial.

Estas proposiciones pueden demostrarse por dos experimentos.

1º Se toma un conductor hueco A (fig. 929), colocado en una sala y que comunique con un electrómetro graduado en voltios (945) E, cuya caja metálica comunica con las paredes de la sala. Se carga una

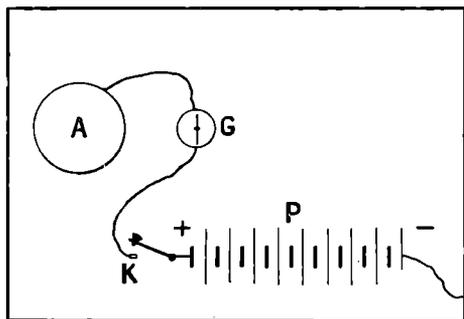


Fig. 930.

bola metálica *a* aislada y se pasa su carga a A, por un contacto interior. En el electrómetro se ve la diferencia de potenciales entre A y las paredes de la sala, que será el potencial de A, si se toma como cero el potencial de las paredes.

Se carga por segunda vez *a* con la misma cantidad de electricidad* y se conduce esta carga a A como se ha hecho antes. Se observará que su

potencial se ha duplicado. Del mismo modo se verá que triplicando, cuadruplicando, etc., la carga de A, el potencial se hará triple, cuádruple, etc.

* Para obtener cargas iguales, se puede tocar con *a* un conductor de grandes dimensiones, o, mejor aún, una armadura de un condensador (936) por ejemplo el reóforo de una botella de Leyden cargada (940), cuya armadura exterior esté en el suelo. Y se comprobará que la carga de *a* es la misma cada vez, mediante un cilindro de Faraday (886).

2º Tómase una pila de gran número de elementos; se coloca en el suelo su polo negativo, y el otro polo, en comunicación con el conductor A (fig. 930), por medio de un galvanómetro sensible G, provisto de un interruptor K. Se nota la desviación del galvanómetro en el momento en que se establece la comunicación.

Luego, se descarga el cuerpo A y se repite el experimento modificando la fuerza electromotriz de la pila*.

De este modo se hallará que las cantidades de electricidad que atraviesan el galvanómetro en el momento de la carga son proporcionales a las fuerzas electromotrices, lo cual demuestra la proposición enunciada.

927. **Capacidad eléctrica.** — Mediante cualquiera de los aparatos anteriores, se ve que para cargar diversos conductores con el mismo potencial, no hace falta, en general, la misma cantidad de electricidad. Por ejemplo, tratándose de conductores semejantes, los mayores exigen mayor cantidad que los pequeños, en igualdad de potencial. Dicese que aquéllos tienen mayor *capacidad eléctrica*.

Llámase, en general, *capacidad eléctrica* del sistema formado por un conductor y un recinto conductor que lo rodea, *el cociente constante de la carga Q del conductor por la diferencia de potenciales V que existe entre él y el recinto*. Se tiene pues :

$$C = \frac{Q}{V} \quad \text{de donde} \quad Q = CV.$$

Esta fórmula conduce a un gran valor de capacidad si, por llegar a una diferencia determinada de potenciales V, se necesita una gran cantidad de electricidad, lo cual se ajusta a la convención precedente.

Si las paredes del recinto están suficientemente alejadas del conductor, los experimentos demuestran que esta magnitud no depende del recinto, sino sólo del conductor : en este caso, se la denomina *capacidad del conductor*, si, además, se parte del potencial del recinto como cero, se puede decir :

La capacidad eléctrica de un conductor es el cociente de su carga por su potencial.

Analogía hidráulica. — Se puede asimilar el fenómeno de la carga eléctrica al de llenar un vaso cilíndrico A por medio de una bomba P. (fig. 931). La cantidad de agua que hay que hacer pasar del recipiente B al vaso A

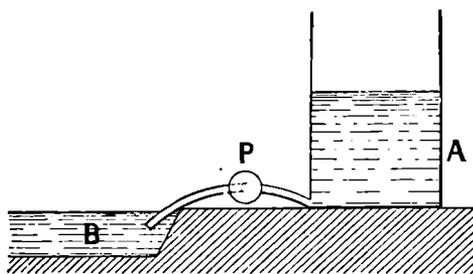


Fig. 931.

es proporcional a la diferencia de nivel que se establece entre B y A. Además, la magnitud análoga a la capacidad eléctrica es la sección del

* Lo que se realiza, por ejemplo, cambiando el número de los elementos supuestos idénticos. Conviene servirse de pequeñas pilas de carga que describiremos más adelante (946) o de una serie de acumuladores pequeños cuya fuerza electromotriz es mucho más constante.

vaso A; porque, para establecer la misma diferencia de nivel con vasos A de secciones diferentes, harán falta cantidades de agua proporcionales a las secciones de los vasos.

928. **Unidades de capacidad eléctrica.** — Faradio. — Microfaradio. — Si en la fórmula precedente $Q = CV$, se hace $Q = 1$ y $V = 1$, se tiene $C = 1$. Luego *la unidad de capacidad eléctrica* es la capacidad eléctrica del sistema formado por un recinto conductor y un conductor tal que, *si se le comunica una carga de un culombio, se establece entre él y el recinto una diferencia de potenciales de un voltio.*

Esta unidad ha recibido el nombre de *faradio*. Es extremadamente grande (930); por esta razón, se emplea también una unidad *práctica* que es un millón de veces más pequeña, *el microfaradio*.

929. **Relación entre la carga de un conductor, su capacidad y su potencial.** — La fórmula $Q = CV$ demuestra que *la carga de un conductor se obtiene multiplicando su capacidad eléctrica, expresada en faradios, por la diferencia de potenciales que existe entre este conductor y el recinto que le rodea* (también se dice, *por el potencial del conductor*, si se toma como cero el potencial del recinto).

930. **Capacidad de una esfera.** — Valores del faradio y del microfaradio. — *La capacidad de una esfera, aislada en un recinto conductor cuyas paredes estén muy alejadas de ella, es proporcional a su radio.*

Esta proposición puede establecerse experimentalmente por medio de uno de los aparatos de las figuras 929 y 930, tomando sucesivamente como cuerpo A, diversas esferas conductoras. Se observa que, para establecer entre una esfera y el recinto una diferencia de potenciales dada, hace falta una cantidad de electricidad proporcional al radio de la esfera. Este fenómeno puede demostrarse también experimentalmente (935).

Enorme valor del faradio. — La teoría (934) y el experimento demuestran que el faradio es la capacidad del sistema formado por un recinto de dimensiones ilimitadas y por una esfera interior que tenga un radio de 9 millones de kilómetros.

En consecuencia, el microfaradio es la capacidad del sistema formado por un recinto conductor de dimensiones infinitas y una esfera interior de 9 kilómetros de radio. Puede realizarse prácticamente por medio de condensadores (951).

Cálculo de la capacidad de una esfera. — Como una esfera de 9 000 000 de kilómetros, o sea 9×10^{11} cm. de radio, tiene una capacidad de 1 faradio, una esfera de radio R cm. tendrá por capacidad :

$$C = \frac{R}{9 \times 10^{11}} \text{ faradio.}$$

931. **Comunicación de la electricidad entre dos conductores de potenciales diferentes.** — Supongamos dos conductores A y B (suficientemente separados para que no actúen sensiblemente uno sobre otro), con potenciales diferentes (el de A mayor que el de B). Pongámoslos en comunicación por un alambre delgado (a fin de que su carga y,

por consiguiente, la influencia que aquél ejerce sean despreciables) : los dos no formarán sino un sólo conductor y en el electrómetro se verá que sus potenciales se vuelven iguales: el de A disminuye, el de B aumenta y el conjunto adquiere un potencial intermedio común. Esto no puede verificarse sin que la carga positiva de A (proporcional a su potencial) disminuya y la positiva de B aumente. En este fenómeno, de acuerdo con el principio de conservación de la electricidad, la carga total continúa siendo la misma. Este hecho se expresa diciendo que del cuerpo de más alto potencial A, pasa electricidad positiva al cuerpo de potencial menor B. Durante este paso, el alambre conductor es recorrido por una corriente, que se puede observar en un galvanómetro.

El potencial final depende no sólo de los potenciales primitivos V_1 y V_2 , sino también de las capacidades eléctricas C_1 y C_2 . La carga inicial de A era $C_1 V_1$; la de B, $C_2 V_2$. Después de la comunicación, la carga total es $C_1 V_1 + C_2 V_2$ y la capacidad del conjunto es $C_1 + C_2$. Llamando V al potencial final, tenemos :

$$C_1 V_1 + C_2 V_2 = (C_1 + C_2) V;$$

de donde

$$V = \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2}{C_1 + C_2}.$$

Analogía hidráulica. — El fenómeno es análogo al que ocurre cuando se unen entre sí, por medio de un tubo que llegue a sus respectivos fondos, dos vasos que contengan un líquido a diferente nivel : del vaso cuyo nivel es más elevado, pasa líquido al otro, hasta que los dos niveles se hallen en un mismo plano horizontal.

Caso particular de una pila. — Los dos polos de una pila en circuito abierto son dos conductores de potenciales diferentes. No obstante, si se los pone en comunicación metálica, estos potenciales no se igualan como ya sabemos (775). Esto se debe a la fuerza electromotriz de la pila, que mantiene una diferencia de potenciales entre sus polos, a pesar de la producción de electricidad.

932. **Proporcionalidad entre la carga de un conductor y su potencial.** — Teoría. — Supongamos un conductor aislado en medio de un recinto de grandes dimensiones. La diferencia de potenciales entre este conductor y el recinto es igual a la diferencia de potenciales entre el cuerpo y un punto situado en el infinito. Para calcularla, basta calcular, para un punto cualquiera del conductor, $\sum \frac{q}{r}$, en que q representa la carga de un elemento de la superficie del conductor y r , su distancia al punto considerado. Como cada término q es proporcional a la carga total del conductor, se ve que la diferencia de potenciales entre el conductor y el recinto es proporcional a esta carga.

933. **Unidad electrostática de capacidad.** — Es la capacidad del sistema formado por un recinto conductor y un conductor, y tal que, si se comunica al conductor una carga de una unidad electrostática de cantidad de electricidad, se establece entre él y el recinto una diferencia de potenciales igual a la unidad electrostática de diferencia de potenciales.

La fórmula $Q = CV$ se emplea también para calcular la carga de un conductor : Q , C y V se expresan en unidades electrostáticas.

Expresión del faradio en unidades electrostáticas. — Sea C el valor del faradio en unidades electrostáticas de capacidad eléctrica. Cuando un faradio (o C unidades

electroestáticas) está cargado con un culombio (o 3×10^9 unidades electroestáticas) adquiere un potencial de un voltio (o $\frac{1}{300}$ de unidad electroestática); luego, tenemos,

$$3 \times 10^9 = C \times \frac{1}{300};$$

de donde

$$C = 9 \times 10^{11},$$

por consiguiente, *el faradio vale 9×10^{11} unidades electroestáticas de capacidad.*

934. **Capacidad de una esfera.** — Supongamos una esfera conductora de radio r cm. que se supone aislada en un recinto de dimensiones infinitas. Calculemos, para el centro, la diferencia de potenciales entre la esfera y el recinto, que llamaremos potencial de la esfera. Basta efectuar la suma $V = \sum \frac{q}{r}$; como r es igual en todos los elementos de superficie, tendremos

$$V = \frac{1}{r} \Sigma q = \frac{Q}{r},$$

llamando Q a la carga total de la esfera. Luego

$$Q = rV.$$

Esta fórmula demuestra que *la capacidad de una esfera, evaluada en unidades electroestáticas de capacidad, es igual a su radio, medido en centímetros.*

Por consiguiente, en faradios, la capacidad de una esfera será $\frac{r}{9 \times 10^{11}}$.

935. **Unidad electromagnética cegesimal de capacidad eléctrica.** — El faradio y el microfaradio pertenecen al sistema práctico electromagnético (846). *La unidad electromagnética cegesimal de capacidad eléctrica es: la capacidad eléctrica de un conductor que, cargado de una unidad electromagnética de cantidad de electricidad, adquiere, con el recinto que le rodea, una diferencia de potenciales igual a una unidad electromagnética de diferencia de potenciales.*

La fórmula $Q = CV$ se aplica en unidades electromagnéticas cegesimales.

Sea C el valor de un faradio en unidades electromagnéticas. Para una carga de un culombio. tenemos ($Q = 10^{-1}$) un potencial de un voltio ($V = 10 + 8$).

Por consiguiente

$$10^{-1} = C \times 10^8; \quad \text{de donde:} \quad 10^{-9}.$$

El faradio vale, pues, 10^{-9} unidades electromagnéticas cegesimales de capacidad y, por lo tanto, la unidad electromagnética cegesimal vale 10^9 faradios.

La unidad electromagnética cegesimal es, pues, mil millones de veces mayor que el faradio.

Valor de la unidad electromagnética cegesimal en unidades electroestáticas. — Como el faradio vale 9×10^{11} unidades electroestáticas, la unidad electromagnética C. G. S., que vale 10^9 faradios, será igual a 9×10^{20} unidades electroestáticas.

CONDENSADORES

Condensación. — Condensadores. — Repitamos los experimentos precedentes (fig. 929 y 930), acercando las paredes del recinto, muy próximas al conductor A. A lo podemos constituir por una esfera conductora, y el recinto, por una esfera hueca B (fig. 932 y 933) que rodee a A. Observaremos que para establecer entre A y B una diferencia de potenciales dada, hay que transmitir a A una carga mayor que si el recinto estuviera alejado de A. Más adelante, explicaremos la causa de este fenómeno llamado *condensación de la electricidad*, porque permite acumular gran cantidad eléctrica en un cuerpo tal como A.

De ahí resulta que la superficie exterior de A se halla cargada intensamente de electricidad, positiva por ejemplo, y la superficie

interior de B está cargada de una cantidad equivalente de electricidad negativa (teorema de Faraday, 896).

El conjunto de los dos conductores A y B se denomina *condensador*

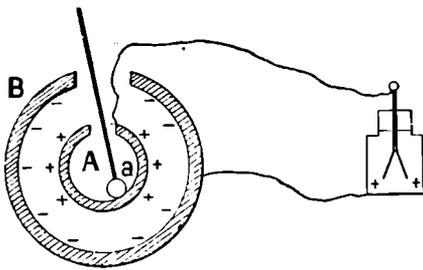


Fig. 932.

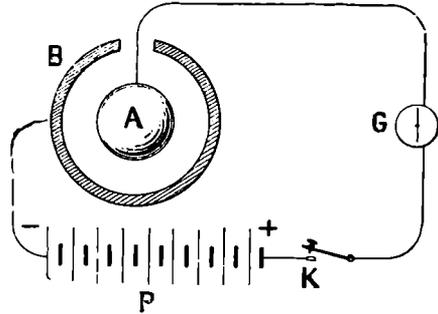


Fig. 933.

cerrador; A y B son las *armaduras* del condensador; A es la armadura interior y B, la exterior.

En general, llámase *condensador* un sistema de dos conductores dispuestos de modo que comuniquen gran capacidad eléctrica al sistema. Se dice que el condensador está cerrado, cuando uno de los dos conductores rodea completamente al otro.

Condensador plano. — Los *condensadores cerrados* son difíciles de construir y poco manuable; por esta razón, actualmente se los reemplaza, muy a menudo, por *condensadores planos*. Las armaduras de éstos están constituidas por platinos metálicos, A y B, paralelos, colocados a poca distancia uno de otro (fig. 934). Si se establece entre ellos una diferencia de potenciales, por cualquier medio (942), el que esté a mayor potencial, A, por ejemplo, se carga positivamente; al mismo tiempo, B se carga negativamente en la superficie que se halla enfrente de A. Si los platinos están a muy poca distancia y alejados de todo otro conductor, las cargas de A y B sobre las superficies que se hallan frente a frente son muy grandes respecto de sus cargas externas (que entonces son despreciables) e iguales en valor absoluto.

Causa de la condensación. — Tomemos un platillo metálico A (fig. 934), que comunique con los panes de oro de un electroscopio, y otro platillo metálico B, alejado, al principio, de A. Todo está en un recinto conductor con el cual comunican A y la caja del electroscopio. Car-

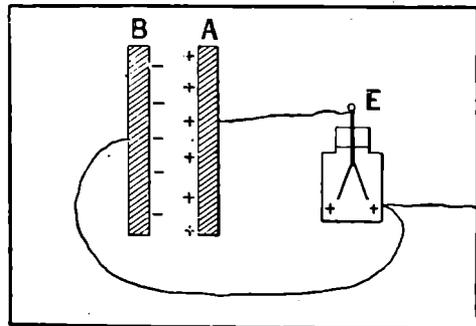


Fig. 934.

guemos A con cierta cantidad de electricidad, positiva por ejemplo; el electroscopio se desvía, indicando cierta diferencia de potenciales entre A y el recinto, es decir entre A y B. Acerquemos B a A y veremos que

las hojas de oro del electroscopio se acercan, porque B se carga negativamente, por influencia, y que la electricidad negativa disminuye el potencial de A. Si, luego, queremos dar a A el potencial que tenía antes de acercarse a B, habrá que proporcionarle mayor cantidad de electricidad. Así, se comprende que aumente la capacidad del sistema formado por A y B.

937. **Definición de la capacidad de un condensador.** — En el caso de un condensador cerrado, como en los casos en que un conductor esté rodeado por un recinto conductor, *existe una relación constante entre la carga de la armadura interna y la diferencia de potenciales V que existe entre las dos armaduras. Este cociente es la capacidad del condensador, y se tiene*

$$\frac{Q}{V} = C, \quad \text{de donde} \quad Q = CV.$$

En el caso de un condensador no cerrado (condensador plano por ejemplo), si Q es la carga de una armadura y V la diferencia de potenciales entre las dos armaduras, el cociente $\frac{Q}{V}$ es sensiblemente constante, si dichas armaduras están a poca distancia y alejadas de otro conductor. En estas condiciones llámase capacidad del condensador *el cociente de la carga de una de sus armaduras por la diferencia de potenciales entre las dos armaduras.* La fórmula $Q = CV$ se aplica también a este caso.

La capacidad de un condensador se expresa en faradios y microfaradios.

938. **Efectos de los dieléctricos.** — **Poder inductor específico :** — Si entre los platillos A B (fig. 934) se interpone un dieléctrico, como, por ejemplo, azufre, parafina, vidrio, ebonita, mica, etc., se observa que las hojas de oro del electroscopio se acercan. Por consiguiente, quedando constantes las cargas de A y B, su diferencia de potenciales disminuye y la capacidad del sistema aumenta.

Llámase *poder inductor específico* de un dieléctrico la *relación* que existe entre la capacidad de un condensador que contenga a este dieléctrico entre sus armaduras y la capacidad del mismo condensador que comprenda *el vacío* *.

Se obtendrá, pues, la capacidad de un condensador de *lámina dieléctrica*, multiplicando la capacidad del mismo condensador, con *lámina de vacío*, por el poder inductor del dieléctrico. He aquí el poder inductor de algunos dieléctricos sólidos o líquidos :

Parafina	de 2,22 a 2,32
Petróleo	— 1,09 a 2,3
Ebonita.	— 2,0 a 2,08
Goma laca	— 3,1
Vidrio	— 5 a 10
Mica	8

* Como el poder inductor específico de los gases, y, en particular, del aire, se acerca mucho a 1 (varía un poco con la temperatura y la presión), se puede, en vez del vacío, suponer que entre las armaduras hay aire a la temperatura y presión ordinarias.

Ley de Maxwell. — La medida de los poderes inductores específicos, efectuada por métodos muy variados, permite comprobar una consecuencia importante de la teoría electromagnética de la luz (988) llamada *ley de Maxwell*.

El poder inductor específico de un cuerpo es igual al cuadrado de su índice de refracción.

Se ha hecho la comprobación en el caso de los gases, y también, aunque mucho menos completa, en los líquidos y sólidos. Verdad es que, a causa de su poder dispersivo, los líquidos y sólidos no tienen índice de refracción única.

Otra propiedad importante de los dieléctricos, interpuestos entre las armaduras de un condensador, es dejarse atravesar por una chispa eléctrica, con menos facilidad que el aire. La carga de un condensador está limitada por la chispa que brota en ellas para una diferencia de potenciales dada; pero, cuando se reemplaza el aire por un dieléctrico, esta diferencia de potenciales máxima y, por tanto, la carga máxima, aumentarán considerablemente.

939. Construcción de los condensadores. — Asociación de los condensadores en batería. — Se construye muy sencillamente un condensador plano, pegando contra las dos caras de una lámina de vidrio dos hojas de papel de estaño de menor superficie, de modo que a todo alrededor de estas hojas quede un espacio de vidrio que asegure el perfecto aislamiento. Se puede mejorar aún este aislamiento, cubriendo el vidrio con barniz de goma laca, que le quita la propiedad de condensar el vapor de agua atmosférico.

Asociación en batería. — Para obtener un condensador de gran capacidad se reúnen varios poniendo en comunicación unas de las armaduras de cada uno con un conductor A (fig. 935), las otras con otro conductor B. De este modo se forma un nuevo condensador, de capacidad igual a la suma de las capacidades de los condensadores que constituyen la *batería*.

Ya hemos visto cómo se constituye el condensador de los carretes de Ruhmkorff (875); del mismo modo se disponen los condensadores industriales que sirven para la conducción de las corrientes alternas (863).

940. Botella de Leyden. — Jarras eléctricas. — A veces se da a los condensadores la forma, algo modificada de la antigua botella de Leyden (fig. 936, I). En las paredes externa e interna de un frasco de ancho gollete, se pegan dos hojas de estaño que constituyen las armaduras del condensador. Pónese la armadura interior en comunicación con la exterior por medio de un vástago metálico A que atraviesa el tapón de la botella y que termina, en el interior, por alambres en contacto con la hoja de estaño y, en el exterior, por un botón. El aislamiento queda asegurado limitando las dos hojas de estaño suficientemente lejos del gollete y cubriendo con un barniz de goma laca el tapón y el vidrio que queda al descubierto. Las botellas de grandes dimensiones se llaman *jarras eléctricas*. Se forman baterías de varias botellas, colocándolas

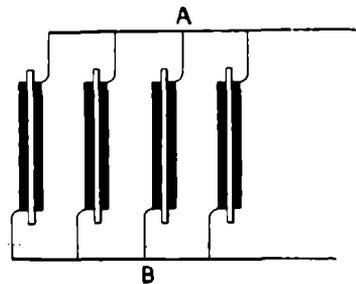


Fig. 935.

unas al lado de otras en una caja (fig. 936, II) cuyo fondo, provisto de hojas de estaño, pone en comunicación las armaduras externas; esta

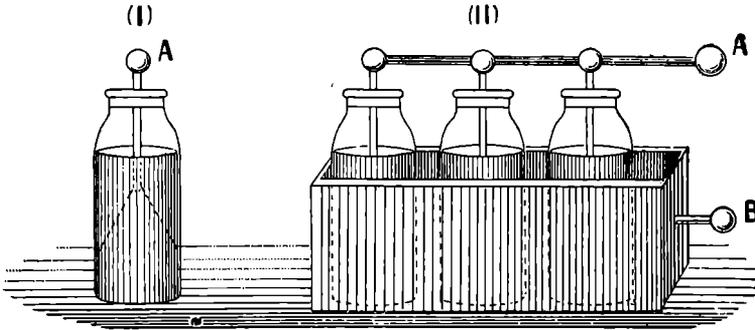


Fig. 936.

hoja está en relación con el exterior por un vástago B. Los botones de las armaduras internas están todos unidos por vástagos conductores A.

Las baterías formadas de este modo son muy incómodas, en cuanto es algo grande su capacidad.

941. Cálculo de la capacidad de un condensador. — I. Condensador plano. — Supongamos un condensador plano (fig. 937), formado por armaduras de dimensiones infinitamente grandes con relación a su distancia e cm., separadas por el vacío, y entre los cuales se establece una diferencia de potenciales V unidades electroestáticas.

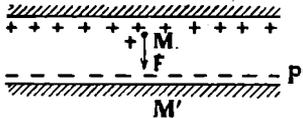


Fig. 937.

Las densidades eléctricas en los dos platillos adquieren valores iguales y de signos contrarios. En efecto, sea σ la densidad eléctrica en el platillo P valorada en unidades electroestáticas, y σ' la del platillo P'. En un punto M' de la masa de uno de los conductores, el campo eléctrico debe ser nulo. Ahora bien, el campo producido por P es $2\mu\sigma$ (907) y el producido por P' es $2\mu\sigma'$. Luego tendremos

$$2\pi\sigma + 2\pi\sigma' = 0, \quad \text{de donde,} \quad \sigma' = -\sigma.$$

Por el contrario, los campos producidos entre los dos platillos por las dos capas, positiva y negativa, son del mismo sentido y se suman. El campo resultante es, pues, $F = 4\mu\sigma$. Por lo tanto, si se transporta la unidad de electricidad positiva, del platillo P al platillo P', la fuerza eléctrica cumple un trabajo $4\mu\sigma e$. Esto trabajo es la diferencia de potenciales V entre los platillos. Luego

$$V = 4\pi\sigma e; \quad \text{de donde} \quad \sigma = \frac{V}{4\pi e}$$

siendo σ la carga de la unidad de superficie de una de las armaduras; el cociente $\frac{\sigma}{V} = \frac{1}{4\pi e}$ es, en unidades electroestáticas, la capacidad del condensador plano, por unidad de superficie.

Si se tiene un condensador plano, cuyas armaduras tienen la misma superficie S centímetros cuadrados, la densidad eléctrica no es exactamente la misma en todos los puntos de las armaduras; es menor en los bordes que en el centro. Pero, si la distancia de las armaduras es pequeña con respecto a sus dimensiones, se puede también admitir la fórmula precedente. La capacidad total es, pues :

$$C = \frac{S}{4\pi e} \text{ unidades electroestáticas.}$$

OBSERVACIONES. — 1ª. Se puede demostrar que esta fórmula se aplica al caso de un

condensador de cualquiera forma, con tal que sus armaduras estén separadas por una distancia e constante y pequeña respecto de sus dimensiones.

2º. En caso de que se interponga entre las armaduras un dieléctrico de poder inductor K , la capacidad se convierte en

$$C = \frac{KS}{4\pi e}.$$

Esta fórmula se aplica a todos los casos. Tratándose del aire, o, mejor aún, del vacío se debe tomar $K = 1$.

3º. Finalmente, la expresión general de la capacidad de un condensador, en faradios, es:

$$C = \frac{KS}{4\pi e} \times \frac{1}{9 \times 10^{11}}.$$

II. *Condensador esférico.* — Supongamos un condensador esférico (fig. 938) cuyas armaduras concéntricas tienen los radios R y ρ . Supongamos también que, por ejemplo, la armadura exterior de radio R está en comunicación con el suelo, es decir con las paredes de la habitación en que se encuentra. Para el centro O de la armadura interior, de radio ρ , el potencial se calcula efectuando la suma $\sum \frac{q}{r}$.

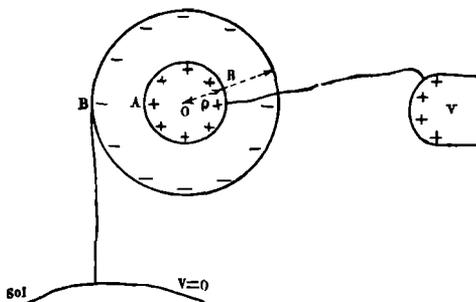


Fig. 938.

Pero, tenemos una carga Q en la armadura interna, a distancia ρ de O , y una carga $-Q$ en la armadura externa, a distancia R de O . Luego

$$V = \left(\frac{Q}{\rho} - \frac{Q}{R} \right) = Q \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R} \right) = Q \frac{R - \rho}{R - \rho}.$$

La capacidad $C = \frac{Q}{V}$ se expresará, pues, por

$$C = \frac{R\rho}{R - \rho}.$$

Se demuestra que estas fórmulas se aplican también cuando la armadura B no está en el potencial del suelo; V representa entonces la diferencia de potenciales entre las armaduras.

942. **Carga de los condensadores.** — Para cargar los condensadores pueden emplearse diversos aparatos.

1º *Pilas.* — Se pueden unir respectivamente las armaduras con los polos extremos de una pila. Gracias al enorme rendimiento de las pilas, la carga es casi instantánea; pero nunca puede ser grande, porque es difícil obtener gran diferencia de potenciales por medio de una pila.

2º *Máquinas eléctricas.* — También pueden ponerse las armaduras en comunicación con los polos de una máquina eléctrica. Según la capacidad del condensador y el rendimiento de la máquina, la carga será más o menos rápida. De este modo se pueden obtener diferencias de potenciales y, por consiguiente, cargas mucho más grandes que con las pilas. Habrá que cuidar de no exceder de la diferencia de potenciales, para la cual puede brotar una chispa entre las armaduras, porque se perforaría el dieléctrico y quedaría inutilizado el condensador. Conviene poner una de las armaduras y, por lo tanto, el polo correspondiente de la máquina, en relación con el suelo (cuando se trata de jarras eléctricas (fig. 936), generalmente es la armadura externa la que se pone en el suelo). La

ventaja es que se podrá tocar impunemente la armadura; puesto que, en este caso, su potencial es igual al del cuerpo.

3º *Transformadores y carretes de inducción.* — Pongamos los extremos del alambre secundario de un transformador o de un carrete de Ruhmkorff en comunicación con las armaduras de un condensador (fig. 939, I). Si la distancia de estas armaduras es suficiente, la corriente secundaria carga el condensador a cierta diferencia de potenciales; pero, en cuanto disminuye la fuerza electromotriz de inducción, el condensador se descarga a través del mismo alambre secundario. Sin embargo, si se unen las dos armaduras a dos conductores *a* y *b* poco distantes uno de otro, durante la carga, la diferencia de potenciales podrá llegar a ser lo bastante grande para que brote una chispa entre *a* y *b*. Estas chispas, llamadas *condensadas*, son las que se emplean para producir el espectro de la substancia que constituye los electrodos *a* y *b*. Las chispas obteni-

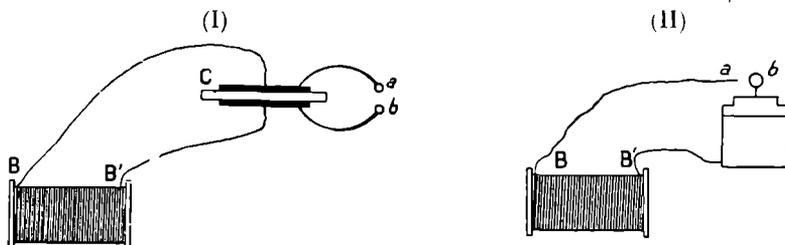


Fig. 939.

das de este modo son mucho más pequeñas que las producidas normalmente por el transformador; pero, en compensación, son mucho más ruidosas y brillantes.

4º De esta manera, por medio de un carrete de Ruhmkorff, puede producirse con rapidez una carga permanente de un condensador. Para esto se aprovecha el fenómeno conocido de que la corriente inducida de ruptura tiene mucha mayor tensión que la de cierre. Entonces se une una de las armaduras del condensador a un extremo del alambre inducido y la otra, al otro extremo; pero dejando en este último un corte *ab* (fig. 939, II). A cada interrupción de la corriente inductora, la inducida pasa, entre *a* y *b*, en forma de chispa, y carga el condensador.

Al cerrarse la corriente inductora no se producirá nada, a causa de la debilidad de la tensión de la corriente inducida correspondiente. A cada interrupción, aumenta la carga del condensador. Un carrete de Ruhmkorff desempeña, así, el papel de una máquina eléctrica de considerable rendimiento.

943. **Descarga de los condensadores.** — Para descargar un condensador, basta unir sus armaduras por un circuito conductor. Por ejemplo, se toca una de sus armaduras con uno de los extremos de un vástago metálico, llamado *excitador* (fig. 940), y se acerca el otro extremo del vástago a la segunda armadura del condensador. Poco antes del contacto, brota una chispa intensa y se descarga el condensador.

La descarga de un condensador constituye una corriente eléctrica de

corta duración, porque, si se efectúa a través de un circuito que comprenda un galvanómetro, éste se desvía bruscamente.

Descargas residuos. — Si después de descargar completamente un condensador de lámina dieléctrica (de vidrio, por ejemplo) se espera algunos momentos, se notará que puede producirse una segunda descarga, menos fuerte que la primera. Del mismo modo, aguardando un momento más, puede producirse una descarga menos fuerte que la anterior, y así sucesivamente. Estas descargas se denominan *descargas residuos*.

Se explican admitiendo, como ha hecho Maxwell, que la electrificación no es propiedad del conductor cargado, sino más bien del aislador que lo rodea. Este dieléctrico se hallará en un estado particular de tensión, siguiendo las líneas de fuerza. Y cuando, por la comunicación metálica entre las armaduras, se suprime la causa de esta tensión, es decir, la diferencia de potenciales, el dieléctrico sólido no vuelve sino lentamente a su primitivo estado.

Se explican admitiendo, como ha hecho Maxwell, que la electrificación no es propiedad del conductor cargado, sino más bien del aislador que lo rodea. Este dieléctrico se hallará en un estado particular de tensión, siguiendo las líneas de fuerza. Y cuando, por la comunicación metálica entre las armaduras, se suprime la causa de esta tensión, es decir, la diferencia de potenciales, el dieléctrico sólido no vuelve sino lentamente a su primitivo estado.

Experimento de Franklin. — *Botella de armaduras móviles.* — Este modo de ver queda confirmado por un experimento antiguo debido a Franklin. Cógese una botella de Leyden de *armaduras móviles*, formada por la reunión de un vaso cónico de vidrio (fig. 941), una armadura exterior metálica en forma de cubilete y una armadura interna móvil. Después de cargada y aislada en un bloque de parafina, se quitan sucesivamente

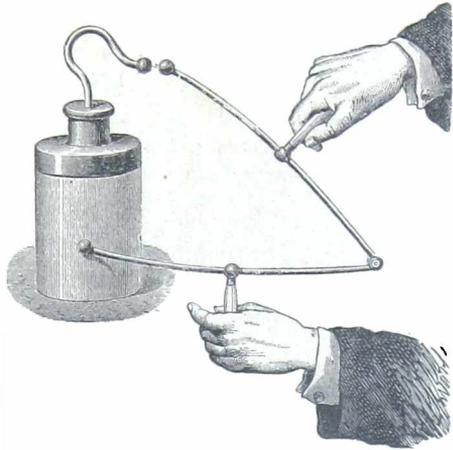


Fig. 940.

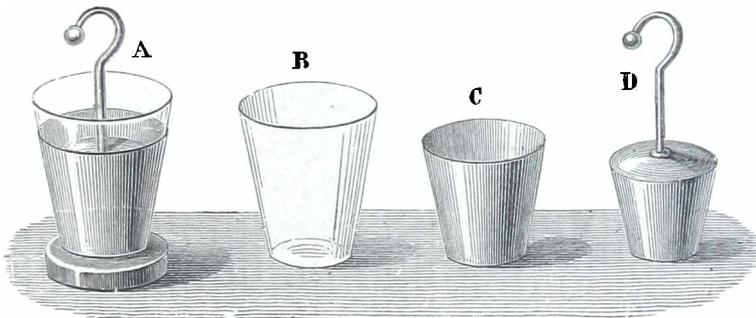


Fig. 941.

con la mano, la armadura interna, el vaso de vidrio y la armadura exterior. De este modo se descargan las armaduras. Reconstitúyese la botella y se observa que de ella se puede sacar una chispa casi tan grande como si no se hubieran descargado las armaduras.

944. *Fenómeno de Kerr.* — La modificación que sufre un dieléctrico en un campo eléctrico se manifiesta por el *fenómeno de Kerr*.

Un dieléctrico, líquido o sólido, colocado en un campo eléctrico, se vuelve birrefringente. Kerr descubrió este fenómeno en 1875 en el flint denso y en diversos líquidos. Pero como la mayor parte del resultado de las experiencias con los sólidos se deben atribuir a un fenómeno térmico, describiremos con preferencia un aparato que puede servir para poner de manifiesto la birrefringencia eléctrica de un líquido.

Se pone el líquido (sulfuro de carbono por ejemplo) en un tubo (fig. 942), que termina en dos espejos de caras paralelas. Dentro del tubo hay dos platillos metálicos paralelos, que comunican con el exterior por dos vástagos BB'. Se hace pasar entre los platillos un haz de rayos luminosos, monocromáticos por ejemplo, que haya atravesado un primer nicol N, y se observa la luz a través de otro nicol N', cuya sección principal es perpendicular a la de N. Es preferible poner las secciones principales de los nicoles a 45° de las líneas de fuerza del campo eléctrico que se va a establecer entre los platillos. En estas condiciones, cuando este campo no existe, no se ve ninguna luz. Pero si se pone B y B' en comunicación con los polos de una máquina eléctrica, de un carrete de Ruhmkorff o de un transformador, se ve que inmediatamente reaparece la luz y no se la puede

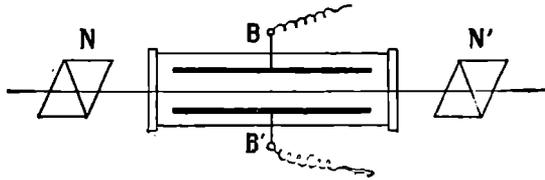


Fig. 942.

hacer desaparecer dando vuelta al analizador N', lo cual prueba que el fenómeno se debe a una birrefringencia y no a una polarización rotatoria adquirida por el líquido bajo la influencia del campo eléctrico.

Kerr separó los cuerpos que estudió en dos categorías: los primeros, que él llamó negativos, se conducen como el vidrio comprimido (cuarzo, aceites de colza, de oliva, etc.); los otros, llamados positivos, se conducen como el vidrio batido. Kerr, y después Quincke han demostrado que la *diferencia de marcha* (δ) entre el rayo ordinario y el extraordinario es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo (H unidades electrostáticas) y a la longitud (l cm) del dieléctrico colocado en el campo, atravesada por el rayo luminoso. Se expresa δ en la forma

$$\delta = K \frac{H^2 l}{100},$$

K se llama entonces la constante de Kerr.

Se podría atribuir la birrefringencia eléctrica, no a la acción directa del campo, sino a una causa secundaria determinada por este campo (tal como el calentamiento del dieléctrico); Blondlot en 1888 y después Abraham y Lemoine en 1899, demostraron que la aparición y desaparición de la luz en el sulfuro de carbono acompañan la producción o la cesación del campo eléctrico con un retraso de 4×10^{-8} segundo, lo cual prueba perfectamente que el fenómeno se debe a la acción directa del campo.

El estudio del fenómeno de Kerr que ya habían hecho muchos experimentadores, lo ha emprendido recientemente Giurgea, el cual ha precisado cierto número de puntos no bien estudiados hasta hoy. Primeramente ha demostrado que el fenómeno de Kerr es una propiedad general de todos los cuerpos aisladores, sin excepción, y que, en el caso de los líquidos, la viscosidad retarda la modificación del dieléctrico bajo la acción del campo. Ha descubierto también que la causa de numerosas anomalías, observadas en los experimentos precedentes, se debe al calentamiento del dieléctrico, que determina una birrefringencia; en el caso de un sólido tal como el flint, la birrefringencia térmica es preponderante cuando se emplea un aparato como el de que se ha servido Kerr para descubrir el fenómeno.

En este caso, la luz que reaparece por efecto del campo eléctrico, desaparece lentamente cuando se suprime el campo. Sirviéndose de un aparato que suprime el efecto térmico, Giurgea ha puesto en evidencia la verdadera birrefringencia eléctrica de los sólidos, la cual desaparece bruscamente con el campo. Finalmente, ha hecho el estudio cuantitativo completo del fenómeno, y ha explicado y corregido las diferencias considerables de los valores de la constante de Kerr dados por los experimentadores precedentes: los números que él ha encontrado para los líquidos varían de 317×10^{-7} para la nitrobenzina a $0,126 \times 10^{-7}$ para el aceite de vaselina.

CAPÍTULO VIII

MEDIDAS ELECTROÉSTATICAS

MEDIDA DE LA DIFERENCIA DE POTENCIALES. — ELECTRÓMETROS

945. **Electrómetros.** — El *electrómetro* es un aparato que sirve para medir la *diferencia de potenciales* existente entre dos conductores.

Un electroscopio de láminas de oro puede transformarse en electrómetro, colocando una esfera graduada detrás de dichas láminas. El aparato se gradúa en voltios del modo siguiente. Se pone el polo positivo de una pila de 50 voltios, por ejemplo, en comunicación con los panes del electroscopio y el negativo con la caja*. Se nota la desviación en la esfera. Repítese la operación con pilas de 100, 150, 200 voltios, etc., y cada vez, se nota la desviación correspondiente, la cual no es forzosamente proporcional a la diferencia de potenciales. Es más cómodo emplear un electroscopio en que uno de los panes se sustituye por una lámina fija que permanece constantemente frente al cero de la graduación, mientras que el extremo de la hoja movable se mueve ante las diversas divisiones.

Si luego, al hacer que dos conductores comuniquen uno con las hojas y otro con la caja de un electroscopio, adquieren las hojas igual desviación que con la pila de 150 voltios, por ejemplo, diremos que la diferencia de potencial entre los conductores es 150 voltios.

Defectos del electrómetro de panes de oro. — El principal defecto del electrómetro de láminas de oro es su poca sensibilidad; pues, en efecto, apenas es sensible, sino para unos cincuenta voltios. Además, el ángulo de las hojas no puede determinarse con precisión.

946. **Electrómetros de cuadrantes.** — El tipo de los electrómetros sensibles y exactos es el *electrómetro de cuadrantes* de Kelvin (sir William Thomson) y sus diversas modificaciones (electrómetro Mascart, electrómetro Ed. Branly, P. Curie, etc).

Compónese esencialmente de una pieza móvil, formada de una lámina delgada de aluminio llamada *aguja*, que tiene la forma de dos cuartos de círculo opuestos (fig. 944), y está colocada entre dos platinillos parale-

* Para este fin, pueden formarse pilas con gran número de elementos de Volta, del modo siguiente. Cada elemento se compone de una lámina de zinc y otra de cobre que se sumergen en un pequeño vaso con agua; únense los elementos en tensión, soldando entre sí la lámina de zinc, de un elemento y la lámina de cobre del siguiente y así sucesivamente. Como estas pilas no tienen que producir sino pequeñas cantidades de electricidad, no se polarizan sensiblemente, con tal que estén bien aisladas. Se obtiene buen aislamiento bañando en parafina las bases de cada vaso. De todos modos, es preferible reemplazar las pilas de Volta por una serie de acumuladores pequeños, en los cuales no hay que temer la polarización.

los PP' (fig. 943), dividido cada uno en cuatro *cuadrantes*. En el modelo de P. Curie la aguja está suspendida por un alambre largo, de platino, de $\frac{1}{50}$ de milímetro de espesor, de un soporte aislado C.

Los cuadrantes superpuestos están ligados entre sí metálicamente, así como los cuadrantes diametralmente opuestos; de modo que el conjunto forma dos pares aislados uno de otro por soportes de ambroide, y en comunicación con el exterior por dos bornes A y B.

El vástago que sostiene la aguja termina en un espejito M, que permitirá evaluar sus rotaciones por el movimiento de una mácula (*spot*) en una escala graduada en milímetros (480). El conjunto está colocado en una caja metálica (no representada en la figura) que se pone generalmente en comunicación con el suelo.

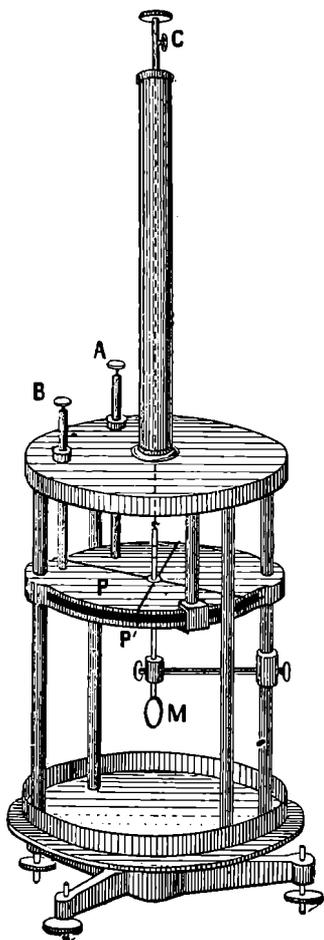


Fig. 943.

Antes de proceder a los experimentos, es indispensable arreglar de una manera precisa la posición de la aguja. Para esto se la hace girar ligeramente por medio del tambor C hasta que, estando los cuadrantes en comunicación con el suelo, la posición de la aguja no varíe cuando se la carga; se acaba de hacer el arreglo moviendo ligeramente uno de los sectores (mediante un mecanismo no representado en la figura).

Entre las diversas maneras de emplear el aparato, citaremos la siguiente. Pónese la aguja en comunicación, por C, con el polo positivo de una pila de un gran número de elementos de carga (por ejemplo, 100), cuyo polo negativo se halla en el suelo (fig. 944, 1). De este modo, la aguja llega a un potencial positivo elevado. Se ponen respectivamente los dos pares de cuadrantes en comunicación con los dos conductores A y B cuya diferencia de potenciales se quiere medir, y

se observará que la aguja es rechazada por los cuadrantes de mayor potencial y atraída por los otros. Y penetra más en los cuadrantes que comunican con el conductor de potencial más pequeño. Por lo tanto, la desviación de la aguja cambia de sentido con la diferencia de potenciales por medir.

La desviación de la aguja es *proporcional a la diferencia de potenciales que existe entre los cuadrantes*. Esto se demuestra poniendo en comunicación los dos pares de cuadrantes sucesivamente con los dos polos de una pila compuesta de uno, dos, tres elementos idénticos, asociados

en tensión*. Se ha comprobado que la desviación de la aguja es siempre proporcional al número de elementos. Y si se conoce la fuerza electromotriz de uno de los elementos, se puede, al mismo tiempo, contrastar

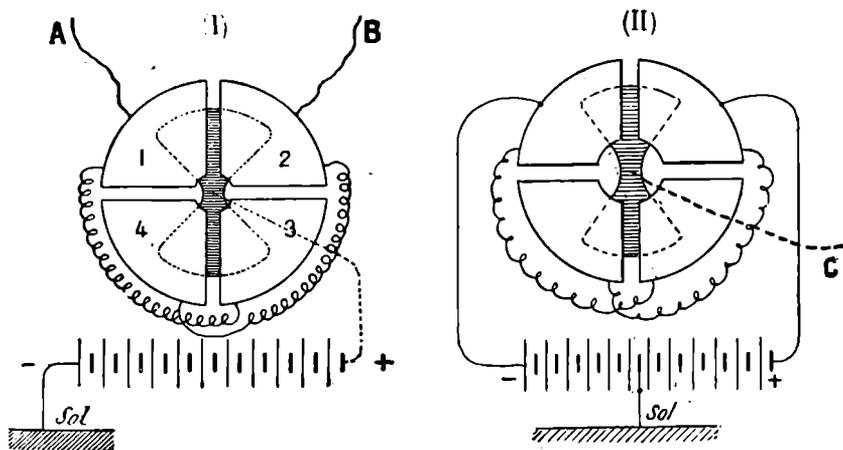


Fig. 944.

el aparato, midiendo la desviación correspondiente a una diferencia de potenciales de un voltio.

La sensibilidad del electrómetro de Curie es tal que una diferencia de potenciales de $\frac{1}{300}$ voltio corresponde a una desviación de 1 mm. en la escala cuando la aguja está cargada 30 voltios del potencial. Reemplazando el alambre metálico de suspensión por un hilo de cuarzo batido (siendo aislador este hilo, se carga la aguja haciendo que comunique un instante con el polo de la pila de carga), se obtiene, para una carga de la aguja de 60 voltios, una sensibilidad de $\frac{1}{2000}$ voltio para una desviación de 1 mm.

Otro modo de proceder. — Se ponen los dos polos de una pila de $2n$ elementos de carga, cada uno de los cuales tiene una fuerza electromotriz e , en comunicación con los cuadrantes, en tanto que el centro de la pila comunica con el suelo (fig. 944, II). De este modo, uno de los pares de cuadrantes adquiere el potencial $V = ne$ y el otro, el potencial $V' = -ne$. Si, después, se hace que la aguja comunique con un conductor, C penetrará aquélla en los cuadrantes de menor potencial cuando el potencial del cuerpo sea positivo, es decir, mayor que el del suelo, y recíprocamente. La desviación de la aguja es, en este caso, proporcional a su potencial.

Fórmula general. — Se ha demostrado que la desviación α de la aguja está determinada por la fórmula general

$$\alpha = K(V - V') \left(\frac{V + V'}{2} \right),$$

siendo K una constante, V_0 el potencial de la aguja, y V y V' los de los dos pares de cuadrantes.

Como $\frac{V + V'}{2}$ es pequeño comparado con V_0 , en el primer caso, α es proporcional a $V - V'$. En el segundo lo es a V_0 ; puesto que $\frac{V + V'}{2}$ es nulo.

947. **Electrómetro de Branly.** — La aguja es una placa ancha de aluminio a (fig. 945) en forma de 8, que se mueve horizontalmente encima de cuatro sectores planos de latón, aislados unos de otros y ligados dos a dos en diagonal. La aguja está sostenida por un alambre metálico que sirve de eje de suspensión; prolongase debajo de la

* Deben tomarse elementos muy constantes, por ejemplo, elementos de Gouy o Latimer-Clark.

placa en un vástago vertical al que está fijo un espejo *m* por medio del cual se evalúa el ángulo de rotación de la aguja por el método de Poggendorff (180).

El alambre está fijo en unas pinzas. Un movimiento lento de estas pinzas permite bajar o subir ligeramente la placa móvil.

948. **Electrómetro capilar de Lippmann.** — *Descripción.* — Compónese esencialmente de un tubo vertical *A* (fig. 946), terminado por su

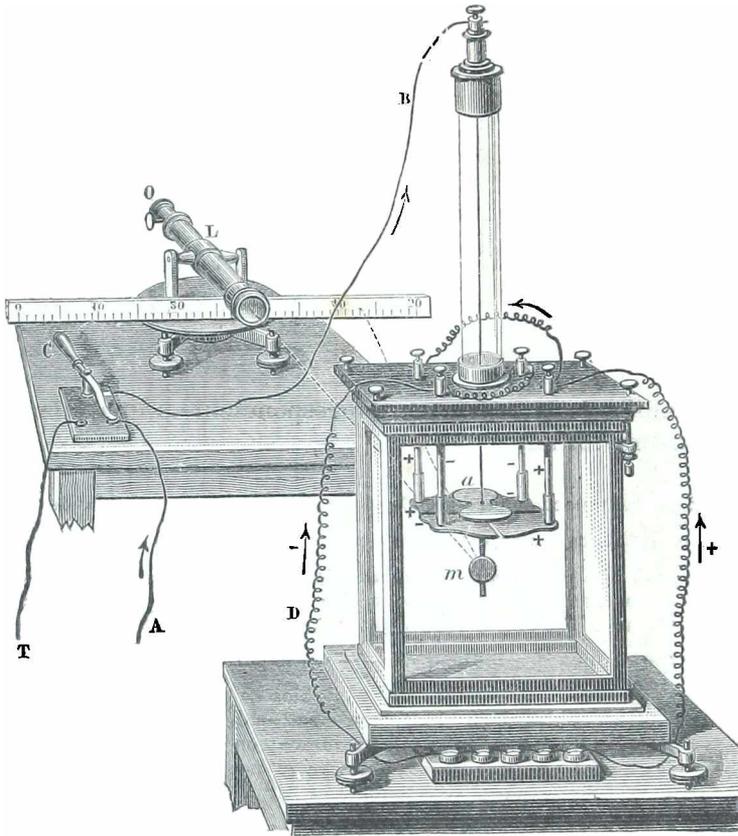


Fig. 945.

parte inferior en una porción aguda de diámetro interior muy pequeño, que se llama la *punta capilar*. El tubo *A* contiene una columna de mercurio que penetra por su peso en la punta y forma una columna cilíndrica muy capilar *a*, terminada en un menisco hemisférico *M*. Esta punta se sumerge en ácido sulfúrico diluido, que está contenido en una probeta cilíndrica *B*, en cuyo fondo hay una capa de mercurio *m*; el agua acidulada está, por una parte, en contacto con el mercurio y llena, por la otra, la extremidad inferior de la punta capilar; moja las paredes de esta y baña el menisco *M*. Dos alambres de platino α y β sirven para poner las masas de mercurio *A* y *m* en comunicación con dos bornes eléctricos aislados *b* y *b'* que constituyen los dos *polos* del electrómetro.

Uso. — Obsérvase que si se ponen los alambres α y β en comunicación

metálica uno con otro, por medio del puente metálico C, el menisco M se para en una posición de equilibrio, que es el cero del aparato. Si ahora se intercala entre α y β , abriendo el puente, una diferencia de potencial e , nótase que el menisco cambia inmediatamente de posición, tomando otra de equilibrio; pues bien *el movimiento del menisco depende de la diferencia de potencial utilizada y puede en consecuencia servirle de medida*. Este fenómeno se debe a la variación de la constante capilar del mercurio bajo la influencia de la polarización (744). Además, se observan los movimientos del menisco, a través de un microscopio horizontal L, colocado en dirección de la punta capilar.

Sensibilidad del instrumento.

— El electrómetro capilar permite apreciar fácilmente la diezmilésima de voltio. Además, sus indicaciones son instantáneas: la columna de mercurio toma inmediatamente y sin oscilaciones la posición de equilibrio que le conviene. Por el contrario, no puede servir directamente para medir las diferencias de potencial superiores a 1 voltio y precisa emplearlo sólo en un sentido determinado, quiere decir, poner el polo α en comunicación con el punto de potencial más bajo*.

Este es un ligerísimo inconveniente, pues el electrómetro de Lippmann se utiliza sobre todo como *aparato de cero*, es decir, para probar la igualdad de dos potenciales.

Modelo de M. C. Limb. — Para el buen funcionamiento del aparato, es necesario que la punta capilar esté muy mojada interiormente por el ácido diluido. Para que se cumpla esta condición, Limb hace que el tubo A sea solidario del frasco F, que contiene mercurio, por medio de un tubo de caucho C. Después del experimento, se baja

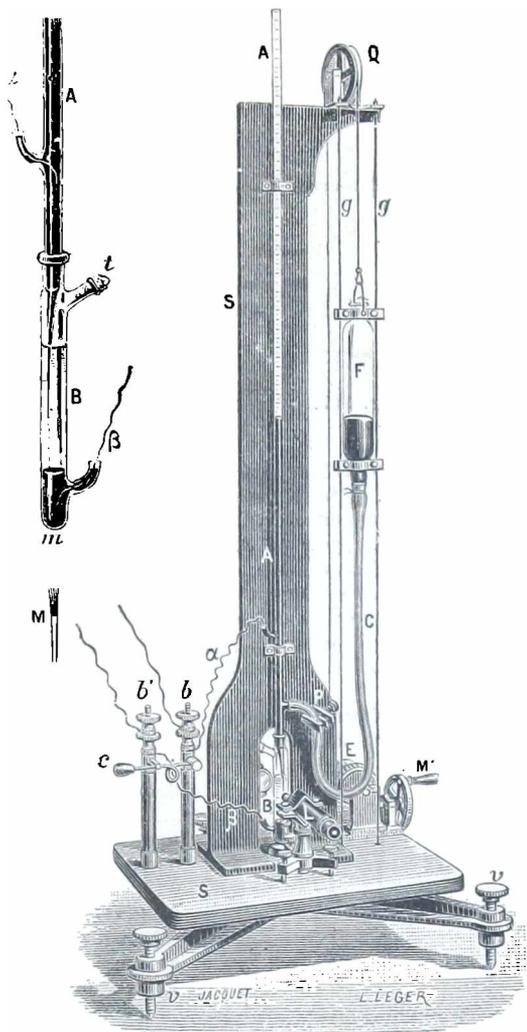


Fig. 916.

* De lo contrario, el menisco, polarizado como ánodo, podría, si llegase a ser muy grande la diferencia de potenciales, cubrirse de sulfato de mercurio que impediría todo movimiento.

el frasco a lo largo de las correderas *g* gracias al manubrio *M'*, a los engranajes *E* y a a polea *Q*, de modo que reciba el mercurio de la columna. Como el menisco deja de estar cargado, vuelve a subir hasta una región más ancha del tubo y el ácido diluido va detrás. Esta ingeniosa disposición evita también la formación de cristales en las regiones útiles de la punta y permite hacer variar fácilmente la presión.

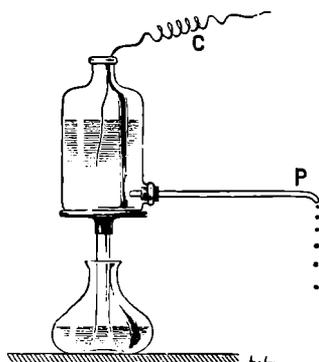


Fig. 947.

Procedimiento de lord Kelvin. — En el punto *P*, en que se desea el potencial (fig. 947), se hace pasar, gota a gota, en el extremo de un tubo delgado, el agua de un vaso cuidadosamente aislado y que esté en comunicación con el electrómetro, mediante un alambre *C*. Cada gota de agua lleva consigo parte de la carga, hasta que el potencial del conductor formado por la masa de agua iguale al del campo en *P*, el electrómetro se desvía lentamente e indica este potencial.

La experimentación demuestra que se obtiene con mayor rapidez el potencial de un punto del campo, colocando en él una pequeña lámpara que se pone en comunicación con el electrómetro; pues la llama de la lámpara desvanece rápidamente su electrificación.

Desde estos últimos años, se emplea también, con el mismo objeto, un trozo de sal de radio (976), sostenido por un conductor que comunica con el electrómetro.

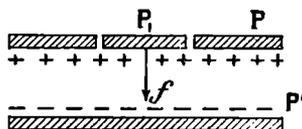


Fig. 948.

950. Medida de una diferencia de potenciales en unidades electroestáticas. — **Electrómetros absolutos.** — El tipo de los electrómetros llamados *absolutos* destinados a medir una diferencia de potenciales en unidades electroestáticas, es el electrómetro de platillos, de lord Kelvin. De este aparato, que ha sido modificado de diversas maneras, indicaremos sólo el fundamento.

Consideremos un condensador plano (fig. 948) y supongamos que se haya cortado, en uno de sus platillos *P*, una porción de superficie *s*, cuya área *s* sólo

está separada del resto del platillo por una hendidura estrecha y unida eléctricamente a él. Cuanto a la densidad, nada cambia en esa porción de superficie*.

Existirá, pues, una tensión eléctrica $2\pi\sigma^2$ (908) y, por consiguiente, toda la superficie *s* estará sometida a una fuerza de intensidad $f = 2\pi\sigma^2 s$. Reemplazando a σ por su valor $\frac{V}{4\pi e}$ (941), tenemos:

$$f = \frac{V^2 s}{8\pi e^2}, \quad \text{de donde} \quad V = e \sqrt{\frac{8\pi f}{s}}.$$

Por lo tanto, para obtener *V*, basta medir *s*, *e* y *f*. Los instrumentos que se emplean, se diferencian según los medios de efectuar estas medidas.

Otros electrómetros absolutos. — **1º Electrómetro esférico de Lippman.** — Lippman indicó una forma completamente esférica de electrómetro. Consta de un condensador esférico (fig. 949), entre cuyas armaduras se establece la diferencia del potencial por medir. La armadura externa está dividida en dos partes por un plano diametral horizontal. El casquete superior está suspendido de una balanza. A causa de la carga

* El resto del platillo asegura la uniformidad en esta porción *s*. Lord Kelvin lo llamó *anillo de compensación*. Sin este anillo, la densidad *s* sería mayor en los bordes que en el centro.

que adquiere la esfera, se rechazan los dos hemisferios. Esta repulsión se mide por medio de la balanza y permite determinar la diferencia de potenciales que se busca.

2º *Electrómetro cilíndrico de Bichat y Blondlot.* — Se compone de dos cilindros verticales. Uno de ellos es hueco, y el otro, que tiene el mismo eje, penetra en su interior. Cuando se establece, entre ambos cilindros, una diferencia de potenciales, el interior tiende a penetrar en el primero. Mídese la fuerza ejercida de este modo entre los dos cilindros, y de ahí puede deducirse la diferencia de potenciales.



Fig. 949.

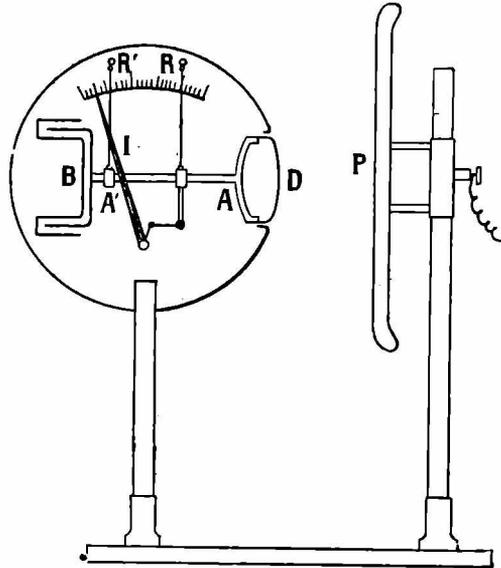


Fig. 950.

951. **Voltímetros electrostáticos.** — Estos instrumentos, que sirven para medir las grandes diferencias de potenciales, son electrómetros robustos. Algunos se fundan en el mismo principio que el electrómetro de cuadrantes. El voltímetro de Villard y de Abraham (fig. 950) se asemeja al electrómetro absoluto. Tiene la forma de una caja metálica, sostenida en una columna de vidrio. Un vástago horizontal AA' interior, suspendido por dos hilos de acero RR', constituye una especie de péndulo, cuyos movimientos se transmiten, por una biela y un manubrio, a una aguja indicadora I. Uno de los extremos de AA' tiene una campana, que, penetrando en una cavidad anular, forma amortiguador de aire; en el otro extremo hay un órgano esencial D, que es una cápsula de aluminio, que frisa con el nivel de una abertura de la caja. En frente de esta cápsula móvil hay un ancho platillo P aislado. Entre la caja y al platillo se establece la diferencia de potenciales que se trata de medir. La capsula D se mueve, bajo la influencia de las fuerzas de tensión electrostáticas, tanto más cuanto mayor es la diferencia de potenciales, lo cual se manifiesta por un movimiento de la aguja en el cuadrante. Este instrumento se gradúa por comparación con un electrómetro absoluto, y puede servir hasta para 300 000 voltios; para variar su sensibilidad, basta acercar más o menos el platillo a la caja.

Los voltímetros estáticos dan indicaciones independientes del sentido de la diferencia de potenciales; luego pueden servir para las diferencias de potenciales alternas, y entonces indican la diferencia de potenciales eficaz.

MEDIDA DE LAS CAPACIDADES Y DE LAS CARGAS ELÉCTRICAS

952. **Medida de las capacidades.** — *Capacidad de un condensador.* — 1º La capacidad de un condensador puede medirse en faradios del modo siguiente :

Después de cargar el condensador por medio de una pila de fuerza electromotriz cono-

cida, e voltios, se descarga a través de un galvanómetro balístico. La desviación del galvanómetro mide la cantidad de electricidad q culombios que cargaba el condensador y la capacidad de éste es $C = \frac{q}{e}$.

Puede aumentarse la sensibilidad del método produciendo un gran número de descargas por segundo. Para esto se usa una placa vibrante l (fig. 951) de frecuencia n que, oscilando entre dos contactos a y b , carga alternativamente el condensador C y lo descarga a través de un galvanómetro G . La figura indica las conexiones que deben establecerse para conseguir este resultado. El galvanómetro adquiere una desviación permanente, como hubiera hecho bajo la acción de una corriente $i = nq$. La desviación del galvanómetro nos da a conocer i , y de ésta se deduce $q = \frac{i}{n}$.

2º Si el condensador es de forma geométrica, puede calcularse *a priori* su capacidad, en unidades electrostáticas. Este es el caso en que se halla, por ejemplo, un condensador plano, con anillo de compensación, o bien un condensador esférico.

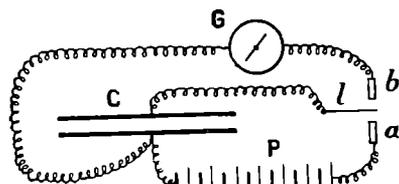


Fig. 951.

3º Cuando, ya por medida directa o ya por cálculo, se conoce la capacidad de un condensador, se le puede comparar la de otro. Para esto, el condensador de capacidad desconocida x se carga con una diferencia de potenciales V que se mide por medio de un electrómetro: luego se ponen respectivamente sus armaduras en comunicación con las del condensador de capacidad conocida C , descargado primitivamente. La carga $Q = xV$ del primero se reparte entre los dos. Mídese la diferencia de potenciales final V' entre las dos armaduras. Y tendremos:

$xV = (C + x)V'$

De donde se saca el valor de x .

Condensadores tipos. — *Condensadores Bouty.* — Para estas comparaciones se emplean *condensadores tipos*, formados por láminas plateadas, de mica, y superpuestas (*condensadores Bouty*). De este modo, puede obtenerse, en poco volumen (algunos centímetros de espesor, con una superficie de 1 dm^2), una capacidad de un microfaradio.

Medida de la capacidad de un conductor cualquiera. — Puede emplearse el procedimiento de medición por medio de una pila y un galvanómetro, si el cuerpo es de capacidad suficiente y el galvanómetro bastante sensible. De este modo se obtendrá la capacidad en faradios. También puede compararse la capacidad del conductor con una capacidad conocida, por ejemplo, la de una esfera aislada lejos de todo conductor. Para esto, cárgase el conductor de capacidad desconocida, con un potencial V , se le pone en comunicación con la esfera descargada de antemano, y se mide el potencial común. El cálculo se efectúa como lo hemos hecho antes para el condensador.

Si se toma por capacidad de la esfera el número que mide su radio en centímetros y se mide el potencial en unidades electrostáticas, se tendrá también en unidades electrostáticas la capacidad del conductor.

953. *Carga de un conductor o condensador cualesquiera.* — La carga Q de un condensador se calcula por la fórmula $Q = CV$, cuando se haya medido la capacidad del condensador y la diferencia de potenciales que existe entre sus armaduras. Para un conductor cualquiera se efectúa el mismo cálculo: designando por C la capacidad del conductor y por V su potencial, es decir, la diferencia de potenciales que existe entre él y las paredes del cuarto en que se opera. En los dos casos, Q queda determinado, bien en culombios, bien en unidades electrostáticas, según se midan la capacidad y el potencial en faradios y en voltios o en unidades electrostáticas de capacidad y de potencial.

954. *Comparación de las unidades electromagnéticas y de las unidades electrostáticas.* — ¿Cómo se ha hallado la relación entre el culombio y la unidad de masa eléctrica? Se ha obtenido midiendo una misma magnitud, carga eléctrica, diferencia de potenciales, capacidad eléctrica, a la vez en unidades electrostáticas y en unidades electromagnéticas.

De estas medidas se ha deducido que el culombio vale 3×10^9 uni-

dades electroestáticas. Si recordamos que un culombio vale, a su vez, la décima parte de la unidad electromagnética de cantidad de electricidad, se ve que : *la unidad electromagnética de cantidad de electricidad vale 3×10^{10} unidades electroestáticas.*

En este número se reconoce *el número que mide la velocidad de la luz en unidades cegesimalas.* Esta coincidencia no es fortuita; puesto que cuanto más se han perfeccionado los métodos de medida de la velocidad de la luz y de la relación de las unidades, más se acercan uno a otro los números hallados. La teoría electromagnética de la luz, de Maxwell, tuvo por punto de partida esta importante observación.

CAPÍTULO IX

ENERGÍA ELECTROESTÁTICA. — DESCARGAS ELÉCTRICAS

955. Trabajo necesario para cargar un conductor. — *El trabajo necesario para cargar un conductor que primitivamente se halla en el potencial del suelo (potencial cero) es el semiproducto de la carga por el potencial final.*

Siendo Q la carga final y V el potencial final, el trabajo \mathcal{E} necesario para cargar el cuerpo es igual a $\frac{1}{2}QV$. Y, puesto que $Q = CV$, tendremos

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2}QV; \quad \text{de donde} \quad \mathcal{E} = \frac{1}{2}CV^2 \quad \text{y} \quad \mathcal{E} = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}.$$

Estas fórmulas dan el trabajo en julios o en ergamias según se emplee el sistema práctico de unidades o el electroestático. También se aplican a los condensadores.

El trabajo \mathcal{E} se llama *energía electroestática* del conductor.

Analogía hidráulica. — Este caso es análogo al siguiente. Se trata de hacer pasar agua de un depósito B (fig. 931) a un recipiente A, ora por medio de una bomba P, ora extrayéndola con un recipiente cualquiera y transportándola de B a A. Sea cual fuere el medio empleado, el trabajo necesario para hacer pasar una masa de agua, suficientemente pequeña para no elevar sensiblemente el nivel en A, se obtendrá multiplicando el peso del agua transportada por la diferencia de nivel que existe entre B y A.

Pero, supongamos que, al principio, el vaso A esté vacío y que su fondo se halle al nivel del agua en B. Tratemos de llenar A haciendo pasar sucesivamente pequeñas cantidades de agua. La primera no pide trabajo alguno; puesto que se la eleva a altura nula. Las por-

ciones sucesivas requieren trabajos cada vez mayores; pero la única que se encuentra a la altura final es la última porción. Fácilmente puede demostrarse que el trabajo total es el mismo que si se hubiera elevado toda el agua a la mitad de la altura final del nivel en A, por cima del de B.

Supongamos asimismo que se tiene un conductor en el potencial cero, por ejemplo un cilindro hueco C (fig. 922), y que se carga mediante un pequeño electróforo E. Para esto, después de poner el platillo E en comunicación con el suelo, se le aísla y transporta a lo interior de A. Si se repite varias veces esta maniobra se puede transportar de este modo una carga pequeña, del potencial cero al potencial que en ese momento posee el cilindro C. Pero, en el trayecto, E es rechazado por C y atraído por el platillo de resina P. Estas fuerzas resisten al movimiento; por lo tanto, hay que efectuar un trabajo para aumentar así la carga de C. Y si este aumento de carga es suficientemente pequeño para no aumentar sensiblemente el potencial de C, sabemos que el trabajo necesario se obtiene multiplicando la carga transportada por el potencial del cuerpo (772).

Si, al principio, D está en el potencial cero, la primera porción de electricidad que transporta E no pide ningún trabajo, porque pasa del potencial cero al potencial cero. Las porciones sucesivas exigen trabajos cada vez más grandes; pero sólo la última será conducida al potencial final; vamos a demostrar que el trabajo empleado es el mismo que si toda la carga fuese transportada del potencial cero al potencial final.

Demostración. — Supongamos un conductor de capacidad C; dividamos la carga total $Q (= CV)$ — que se le debe comunicar — en n partes iguales, cada una muy pequeña. La primera $\frac{Q}{n}$ no solicita trabajo alguno, porque se la lleva al conductor que, en este momento, está en el potencial cero. Pero ella aumenta este potencial que se convierte en

$$V_1 = \frac{Q}{nC}.$$

El segundo aumento de $\frac{Q}{n}$ requiere un trabajo

$$\frac{Q}{n} V_1 = \left(\frac{Q}{n}\right)^2 \frac{1}{C},$$

y llevará el cuerpo al potencial

$$V_2 = \frac{2Q}{nC}, \text{ etc.}$$

Se ve fácilmente que el trabajo por desarrollar tiene el valor

$$\mathcal{E} = \frac{1}{C} \left(\frac{Q}{n}\right)^2 [1 + 2 + 3 + \dots + (n-1)]$$

o

$$\mathcal{E} = \frac{Q^2}{n^2 C} \frac{n(n-1)}{2} = \frac{Q^2}{2C} \left(1 - \frac{1}{n}\right).$$

Si se aumenta indefinidamente n , a fin de que las consideraciones precedentes sean rigurosamente exactas, tendremos

$$\mathcal{E} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2.$$

956. Origen de la energía eléctrica producida por las máquinas. — Como las máquinas eléctricas cargan los cuerpos hasta cierto poten-

cial, producen energía eléctrica: por lo tanto, en virtud del principio de la conservación de la energía, es necesario suministrarles una cantidad de energía equivalente. Esta energía les es dada en forma de trabajo contra las fuerzas eléctricas. Acabamos de verlo en el electróforo; del mismo modo, en el replenisher, cuando C y D (fig. 923) se apartan del conductor diametral, C es atraído por A y repelido por B; y, por el contrario, D es atraído por B y rechazado por A. Estas fuerzas resisten al movimiento. Del mismo modo se vería que en toda máquina de influencia, para que funcione el aparato, debe producirse un trabajo mecánico contra las fuerzas eléctricas. Y no debe confundirse éste con el trabajo perjudicial de los frotamientos en estas máquinas, el cual se transforma en calor.

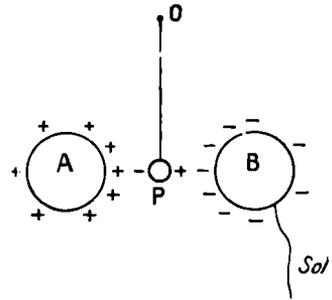


Fig. 952.

957. **Recuperación de la energía eléctrica durante la descarga.** — Un conductor puede descargarse haciéndolo comunicar con el suelo por medio de otro conductor. Sabemos que, antes del contacto, brota una chispa entre los dos conductores (900); además, el conductor de comunicación, durante la descarga es recorrido por una corriente eléctrica. Estos fenómenos desprenden calor. Bajo esta forma aparece la energía que se empleó en la carga. Lo mismo ocurre cuando se descarga un condensador por medio de un excitador.

De esta manera, puede transformarse en trabajo, cuando menos en parte, la energía de un conductor cargado. Supongamos, por ejemplo, un conductor A (fig. 952) cargado positivamente y, en sus inmediaciones, un conductor B en comunicación con el suelo y que se cargue negativamente por influencia. Dispongamos entre ellos una bola pequeña P, suspendida de un alambre aislador. Se electriza por influencia y es atraída por los dos cuerpos. Una de las atracciones es preponderante, la de A, por ejemplo: de este modo, P se pone en contacto con A y abandona su carga negativa, descargando al mismo tiempo a A de una cantidad equivalente. Cargada positivamente, es rechazada por A y atraída por B. Al contacto de este último cuerpo, pierde su carga positiva, y adquiere carga negativa, siendo entonces repelida por B y atraída por A y así sucesivamente. La bola P oscilará, pues, entre A y B, y A se va descargando progresivamente. La energía cinética de la bola, durante estos movimientos, representa una parte de la energía eléctrica de A. Puede suponerse que se transforma en trabajo mecánico.

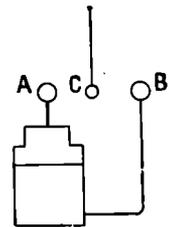


Fig. 953.

El mismo experimento puede efectuarse con un condensador (fig. 953).

958. **Reversibilidad de las máquinas eléctricas.** — Del mismo modo que las máquinas eléctricas pueden transformar el trabajo mecánico en energía eléctrica, pueden también, recíprocamente, transformar la energía eléctrica en trabajo mecánico. Supongamos una máquina sin

frotamientos que carga de electricidades contrarias a dos conductores cualesquiera*. Para esto, hay que vencer las fuerzas eléctricas. Si dejamos de dar vueltas a la máquina, estas fuerzas actuarán para hacerla girar en sentido inverso. Es fácil ver que, en estas condiciones, aquella descarga los conductores, disminuyendo su energía eléctrica.

1^{er} *Experimento*. — En este caso se hallaría un replenisher que se dejase en libertad de obedecer a las fuerzas eléctricas. Se ve que D (fig. 923), cargado positivamente, llegaría al contacto de la escobilla *b* y descargaría en parte B; mientras que C, al llegar al contacto de *a* le comunicaría su carga negativa y descargaría A. Llegando al contacto del conductor diametral, C y D se cargarían de nuevo y se reproduciría el mismo fenómeno hasta que A y B queden completamente descargados.

2^o *Experimento*. — Si se unen mediante conductores los polos de dos máquinas y se hace funcionar una de ellas como *generatriz de energía eléctrica*, la otra empieza a dar vueltas y puede ejecutar un trabajo; en este caso, funciona como motor. Con dos máquinas de Wimshurst se realiza fácilmente el experimento. De todos modos, la energía desarrollada es demasiado pequeña para que este experimento pueda dar lugar a una aplicación práctica del transporte de energía.

959. **Efectos de las descargas de los condensadores en conductores y aisladores.** — Los efectos de las descargas eléctricas de los condensadores son en particular importantes a causa de la magnitud de la energía eléctrica desarrollada. Para estudiarlos se puede hacer que la corriente de descarga recorra un circuito tan complicado como se quiera. Se observará que los efectos son los mismos que los de las corrientes eléctricas. Especialmente, todo el circuito es el centro de un desprendimiento de calor y las porciones más resistentes son las que más se calientan.

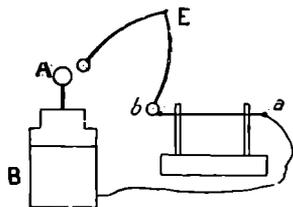


Fig. 951.

Efectos en los conductores. — Se dispone un alambre delgado *ab* (fig. 954), aislado por medio de dos varillas de vidrio, de modo que el extremo *a* se ponga en comunicación con una armadura del condensador, y el *b*, en comunicación con la otra, mediante un excitador. En el momento de la descarga, el alambre puede calentarse al rojo, y hasta volatilizarse; al mismo tiempo se proyecta la materia. Esto se nota colocando, detrás del alambre, un papel, en el cual, después del experimento, se encuentra una marca negra formada por el polvillo del metal.

Efectos en los cuerpos aisladores. — Establezcamos en el circuito de descarga una interrupción, en la cual intercalaremos un aislador sólido. Si la diferencia de potenciales entre las dos armaduras tiene valor adecuado, el aislador, en el momento de la descarga, será atravesado por

* Hay que tomar conductores de gran capacidad a fin de que tengan carga suficiente prácticamente, se utiliza un condensador.

una chispa que lo perforará. Con descargas suficientemente intensas, producense desgarros, rupturas y expansiones violentas.

Efectos químicos. — Los efectos químicos de las descargas consisten en combinaciones y descomposiciones producidas por el paso de la chispa eléctrica por los cuerpos que recorre. Estos efectos parecen debidos a la elevada temperatura que produce el paso de la chispa. Para producirlo se usa el *eudiómetro*. El foco de energía eléctrica más empleado es el carrete de inducción, que produce una serie de chispas por el tiempo que se quiera.

Efluvios eléctricos. — *Aparato de Berthelot.* — Llámase *efluvio eléctrico* el paso silencioso y con *débil resplandor*, de la descarga eléctrica a un medio gaseoso. En estas condiciones la electricidad da lugar a fenómenos químicos notables, que, en general, exigen energía que toman, de este modo, al efluvo. En el aparato de Berthelot (fig. 955), se produce el efluvo entre dos armaduras líquidas de ácido sulfúrico dilatado y los gases van a parar al espacio anular por un tubo. Se produce el efluvo reuniendo por alambres estas armaduras al secundario de un carrete de Ruhmkorff. Una de las principales aplicaciones de este aparato es la preparación del oxígeno ozonizado. Para efectuarla, basta pasar a través del aparato una corriente lenta de oxígeno.

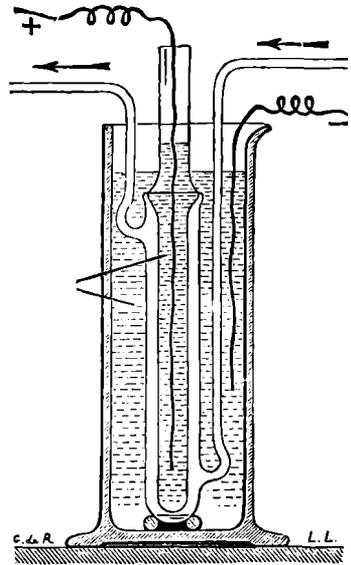


Fig. 955.

LIBRO XI

DESCARGAS EN LOS GASES. — RAYOS X. — RADIO- ACTIVIDAD. — OSCILACIONES ELÉCTRICAS.

CAPÍTULO I

DESCARGAS EN LOS GASES. — RAYOS CATÓDICOS. — RAYOS X.

960. **Estudio de la chispa eléctrica.** — Se produce una chispa eléctrica cuando se establece entre dos conductores una diferencia de potenciales suficiente.

1° *Distancia explosiva.* — Así se llama a la longitud máxima de chispa correspondiente a una diferencia dada de potenciales.

He aquí algunos números relativos al caso en que la chispa estalla a la presión y temperatura ordinarias, entre dos bolas de 5 centímetros de diámetro :

1 cm	32 300
5 —	160 000
10 —	142 500

2° *Forma de la chispa.* — Cuando la chispa hace explosión en el aire, a poca distancia, es rectilínea; más allá de 6 o 7 centímetros de longitud, se vuelve irregular y presenta forma de una curva sinuosa, acompañada de ramificaciones muy desplegadas, principalmente en el polo positivo (fig. 956).

961. **Descargas en los gases enrarecidos. — Tubos de Geissler.** — La distancia explosiva en un gas varía mucho cuando la presión se vuelve débil. Entonces va acompañada de particularidades interesantes que se pueden estudiar sirviéndose de los *tubos vacíos* *.

* Para efectuar este vacío se puede emplear, aparte de los aparatos que ya hemos descrito, la *bomba molecular*, construida recientemente por Gaede, y cuyo principio es el siguiente. En una caja cilíndrica gira rápidamente un cilindro de diámetro más pequeño; la caja tiene interiormente un resalto que toca casi el cilindro giratorio. A consecuencia del frotamiento, el gas del espacio anular es arrastrado y se establece una diferencia de presiones entre las dos caras del resalto; en uno y otro lado de éste están los orificios de aspiración y de salida. Con esta bomba se puede vaciar en pocos minutos una ampolla de rayos X (968) de 1 litro.

Tubos de Geissler. — Los tubos vacíos que primero construyó Geissler, son simples tubos de vidrio cuyos extremos están atravesados por

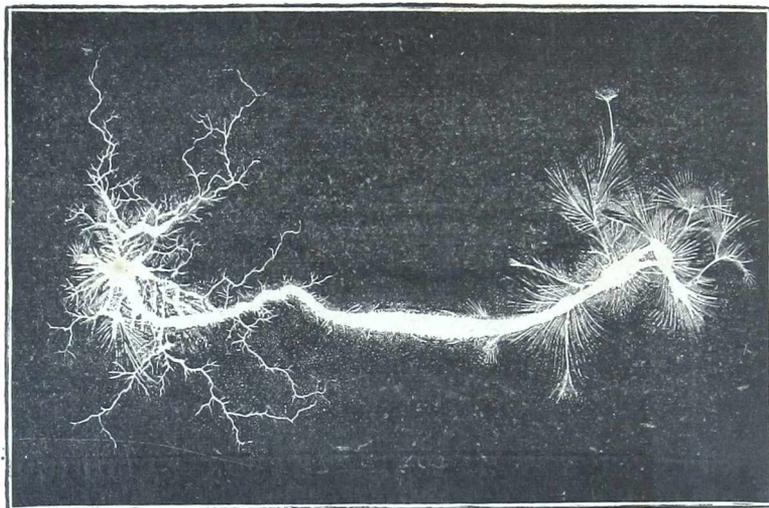


Fig. 956.

alambres de aluminio que sirven de electrodos, en los cuales se ha hecho el vacío a un grado más o menos elevado (fig. 957). Pónense los dos electrodos en comunicación con los polos de una buena máquina de Wimshurst por ejemplo, o de un *carrete de inducción*.

Cuando la presión es de 1 centímetro de mercurio sale un resplandor

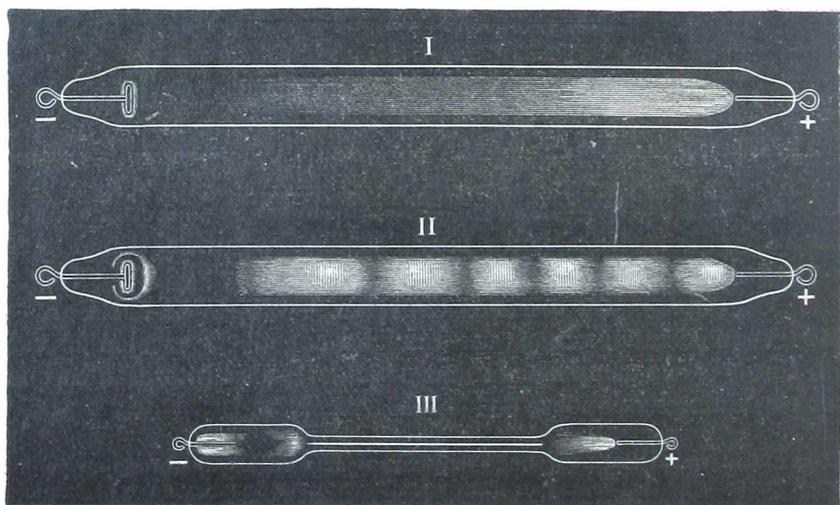


Fig. 957.

violado rosado del electrodo positivo, o *ánodo* (fig. 957, I) y se desvanece a cierta distancia del electrodo de salida, o *cátodo*, dejando una ligera

sombra (espacio obscuro de Faraday); el cátodo está rodeado de una luz rosa con el aire, blanca con el anhídrido carbónico, azul violado con el hidrógeno.

Cuando la presión alcanza 1 milímetro de mercurio, el resplandor positivo se ensancha disminuyendo de longitud y de intensidad; cuando el tubo contiene una mezcla gaseosa, el resplandor resulta estratificado (fig. 957, II). La luz negativa se separa del cátodo; prodúcese una nueva región sombría (espacio obscuro de Hittorf), a la vez que aparece en el cátodo una nueva capa luminosa rosada.

Los tubos de Plucker (fig. 957, III) usados en espectroscopia, son tubos de Geissler que tienen una parte deprimida donde es muy viva la luz; esta parte es la que se coloca delante de la abertura del espectroscopio.

El fenómeno que producen los tubos de Geissler, toma un bellissimo aspecto cuando el tubo es de vidrio de urano, que se vuelve fosforescente. Si se introducen en el tubo substancias capaces de presentar la fosforescencia, se vuelven muy luminosas bajo la influencia de la descarga eléctrica.

Caso de un vacío muy avanzado. — Si se disminuye la presión por medio de una trompa de mercurio que funcione durante varios días, el fenómeno cambia de aspecto. El intervalo oscuro que se hallaba cerca del cátodo, se extiende cada vez más e invade todo el tubo cuando la presión desciende debajo de una centésima de milímetro de mercurio. Entonces se producen los fenómenos de los rayos catódicos (962) que fueron estudiados primeramente por Crookes, en 1879; pero que fueron descubiertos por Hittorf diez años antes.

Caso de un vacío perfecto. — Finalmente, los experimentos de Walhs, Morsen y Schultz han demostrado que si se extrema el vacío cada vez más allá de la milésima de milímetro de mercurio, el tubo resiste tanto más al paso de la descarga. Y hasta se puede llegar a una presión lo bastante reducida para que no haya ninguna descarga. Por lo tanto, *el vacío absoluto es infranqueable a la descarga eléctrica.*

Ley de Paschen. — Paschen y Pean establecieron la siguiente ley, llamada ley de Paschen: *El producto de la presión del gas por la distancia explosiva es constante.*

Esta ley ha sido después comprobada por experimentos de Carr.

Experimentos de Bouty. — Bouty estudió el paso de la electricidad en forma de efluvio, a través de un gas contenido en un matraz, colocado entro las armaduras de un condensador. Sus experimentos le condujeron a los importantes resultados siguientes:

1º A las presiones de algunos milímetros de mercurio, mientras el campo no llega a cierto valor crítico, no se produce en el gas ningún paso de electricidad: pero una vez alcanzado este límite, el gas se ilumina de repente y se vuelve conductor. Dicese entonces, que se ha vencido *la cohesión dieléctrica del gas.*

2º A masa de gas constante, el campo crítico no depende de la temperatura.

3º El potencial mínimo necesario para obtener una descarga, en forma de chispa, entre dos electrodos metálicos colocados en el gas, es el mismo que el potencial necesario para conseguir un efluvio entre dos electrodos separados del gas por láminas de vidrio (a lo menos, mientras que la diferencia de potenciales no exceda de 10 000 o 12 000 voltios).

En su origen, la chispa, como el efluvio, es un fenómeno enteramente localizado en el gas. A esta misma conclusión llegó Hemsalech estudiando el espectro de la chispa.

962. Tubos de Crookes. — Rayos catódicos. — Los tubos de descargas en que se extrema mucho el vacío, bajo una presión de una centésima

de milímetro de mercurio, se denominan *tubos* o *ampollas de Crookes*. En estos tubos, el gas no es luminoso durante la descarga; pero, sea cual fuere la posición del ánodo, el vidrio aparece fluorescente en la parte de tubo situada frente al cátodo, a la cual se llama *anticátodo*. Dicese que del cátodo parten rayos, llamados rayos catódicos.

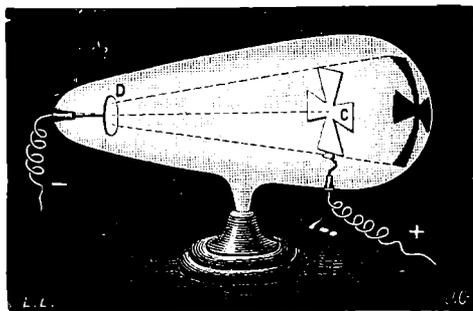


Fig. 958.

Los rayos catódicos se propagan en línea recta. — Si, en efecto, se pone en frente del cátodo una cruz de aluminio, se ve aparecer la sombra de esta cruz en negro en el fondo fluorescente del vidrio (fig. 958).

Los rayos catódicos salen del cátodo normalmente. — Esto se demuestra tomando una ampolla con un cátodo en forma de casquete esférico cóncavo. Los rayos catódicos se juntan en el centro de curvatura, donde se pone incandescente un pedazo de platino, lo cual prueba a la vez que *los rayos catódicos calientan los cuerpos que sufren su acción.*

Los rayos catódicos producen bellísimas fosforescencias con diversas substancias, el cristal, el rubí, el diamante, los sulfuros alcalino-terrosos, el sulfuro de zinc (wurtzita).

Los rayos catódicos producen efectos mecánicos. Poniendo un molinete en la ampolla, gira como bajo la influencia de un soplo lanzado por el cátodo.

Los rayos catódicos son desviados por un imán (o más bien, por un campo magnético), como lo sería una corriente que fuese del anticátodo al cátodo.

También un campo eléctrico desvía los rayos catódicos; los cuerpos cargados positivamente los atraen, y los cargados negativamente los repelen.

Perrin ha demostrado que *los rayos catódicos depositan electricidad en los conductores a que atacan.*

Para esto, dispuso en el tubo de Crookes un pequeño cilindro de Faraday, colocado frente al cátodo y comunicando exteriormente con un electroscopio. Y reconoció que, cuando se acciona el tubo, el electroscopio se carga negativamente.

963. Constitución de los rayos catódicos. — **Corpúsculos catódicos.** — *Supónese* que los rayos catódicos están constituidos por partículas cargadas negativamente, que son repelidas en línea recta por el cátodo, cargado a su vez, negativamente: son los *corpúsculos catódicos*.

De este modo se comprenden las acciones mecánicas de los rayos catódicos. Además, el calor y los efectos de fluorescencia que producen serían debidos a la especie de bombardeo molecular que ejercen sobre los cuerpos a que atacan.

La acción de un campo eléctrico sobre los rayos catódicos se comprende en sí misma. Cuanto a la acción de un campo magnético, ésta se explica

por los efectos que produce el movimiento de los cuerpos electrizados. Cuando *se pone en movimiento un cuerpo electrizado positivamente, produce el efecto de una corriente eléctrica que tenga el sentido de su movimiento.*

Por el contrario, un cuerpo cargado negativamente en movimiento tiene las propiedades de una corriente de sentido inverso al movimiento.*

Así se comprende por qué los corpúsculos negativos que constituyen los rayos catódicos, experimentan, en un campo magnético, la misma desviación que una corriente que se dirigiera hacia el cátodo, es decir en sentido inverso de su movimiento.

Velocidad, carga y masa de los corpúsculos catódicos. — Las desviaciones de los rayos catódicos en un campo magnético y en un campo eléctrico están evidentemente en relación con su velocidad y su carga. De la medida de estas desviaciones dedujo J.-J. Thomson que la velocidad de los corpúsculos debe llegar a 40 000 kilómetros por segundo. Al mismo tiempo calculó la relación entre la carga de un corpúsculo y su masa, y dedujo que 1 gramo de corpúsculos transporta una carga negativa unas 2 000 veces mayor que la transportada por 1 gramo de hidrógeno en la electrólisis.

Se ha admitido que cada corpúsculo lleva la carga de un ion monovalente en la electrólisis: luego, de ahí se deduce que *la masa de cada corpúsculo catódico será 2 000 veces menor que la de un átomo de hidrógeno.*

Por lo tanto, en las teorías actuales, aparecen los corpúsculos catódicos como productos de disgregación de los átomos.

Para explicar la formación de los rayos catódicos se admite que los átomos gaseosos que quedan en el tubo de Crookes se disocian por la descarga en corpúsculos negativos y en *restos* cargados positivamente.

964. **Rayos-canales de Goldstein.** — Si se constituye el cátodo por una placa perforada por varios orificios, aparecen detrás de ésta rayos que Goldstein ha denominado *rayos-canales* (Kanalstrahlen) y que se atribuyen a los restos positivos de las moléculas, disgregadas por la carga. Son, en efecto, desviados por un campo magnético, en sentido contrario al de los rayos catódicos.

Para explicar su formación se supone que los restos positivos son atraídos primero por el cátodo, que está cargado de electricidad negativa. Algunos de ellos penetran en las aberturas del cátodo y entonces se ven libres del campo eléctrico intenso que existe entre los electrodos. En este

* Este fenómeno resulta de los notables experimentos de Rowland. En 1876, demostró que *una masa electrizada en movimiento obra sobre una aguja magnética, como una verdadera corriente.* Esta corriente particular se denomina *corriente de convección*, por oposición a las corrientes ordinarias que se llaman *corrientes de inducción.*

Estos experimentos fueron repetidos por Himstedt, Rowland y Hutchinson, dando siempre resultados positivos.

En 1900, Crémieu creyó poder deducir de sus experimentos que, en contra del resultado de Rowland, la convección no ejerce efecto electromagnético.

Este resultado *fué reputado incorrecto* a consecuencia de los experimentos de Pender y de Vasilescu-Karpen. Finalmente, el efecto electromagnético de la convección eléctrica fué demostrado de modo concreto, en los experimentos efectuados en común por Crémieu y Pender, en la Sorbona.

caso siguen su marcha en línea recta, detrás del cátodo, donde constituyen los rayos de Goldstein.

965. Electrones. — Nuevas hipótesis sobre la constitución de la materia. — Los corpúsculos negativos que constituyen los rayos catódicos han recibido el nombre de *electrones*.

La explicación de la formación de los rayos catódicos ha dado origen a nuevas teorías sobre la constitución de la materia que han sido desarrolladas principalmente por Lorent y Larmor. Según estas teorías, los átomos químicos estarían formados por un centro positivo, acompañado de un número considerable de electrones, siendo nula la suma algebraica de las cargas eléctricas del átomo. Se ha emitido la idea de que estos electrones gravitan al rededor del centro y constituyen un sistema análogo a un conjunto de planetas gravitando al rededor de una estrella. Pero también se pueden suponer otras disposiciones de los electrones respecto del centro.

Además, Riecke y Drude, y luego Thomson, han atribuido a la conducción de la electricidad en los metales, el mismo mecanismo que en los tubos de Crookes. Se supone que los metales contienen electrones negativos y hasta tal vez también centros positivos. El paso de la corriente a un metal resulta del movimiento de los electrones por la influencia del campo eléctrico. Si no hay más que electrones negativos, su movimiento es de sentido inverso al del que atribuimos a la corriente. Si hay también centros positivos, se mueven, al mismo tiempo, en el sentido de la corriente.

La conducción de los metales sería, pues, análoga a la de los electrolitos. En esta hipótesis, para explicar los rayos catódicos se puede imaginar que los electrones salen del cátodo y se proyectan en el tubo.

966. Rayos de Lenard. — Lenard observó en 1894 que cuando se forma la pared anticatódica del tubo de Crookes con una lámina delgada de aluminio batido, puede ser atravesada por rayos capaces de excitar la fluorescencia y de impresionar una placa fotográfica colocada en una caja de aluminio herméticamente cerrada.

Los rayos de Lenard tienen todas las propiedades de los rayos catódicos. Por eso se supone que son producidos por los corpúsculos catódicos, que, gracias a su enorme velocidad, han atravesado la lámina de aluminio. Se ha observado, además, que estos rayos vuelven conductores a los gases y condensan el vapor de agua saturado, como lo hacen los rayos X (973).

RAYOS X

967. Rayos de Röntgen o Rayos X. — El físico alemán Röntgen probó a fines de 1895 que de las partes de un tubo de Crookes heridas por los rayos catódicos parten radiaciones enteramente especiales. Les dió el nombre de rayos X por razón de la imposibilidad en que se hallaba de explicar sus propiedades singulares que puso en evidencia :

1º Se propagan en línea recta, sin ser reflejados, refractados ni difractados por ninguna sustancia.

2º Pueden atravesar los cuerpos opacos para la luz ordinaria.

3º Son insensibles al campo magnético.

4º Propagan la fluorescencia de ciertas materias, sobre todo del platinocianuro de bario.

5º Impresionan las placas fotográficas.

6º Descargan los cuerpos electrizados.

968. **Propagación rectilínea de los rayos X.** — **Radioscopia y Radiografía.** — La propagación rectilínea de los rayos X está probada, lo mismo que respecto de los rayos luminosos ordinarios, por la formación de sombras que producen ciertos cuerpos opacos en dichos rayos.

1º *Radioscopia.* — Si se interpone entre el tubo de Crookes y una pantalla fluorescente de platinocianuro de bario un cuerpo opaco a los rayos X, se ve aparecer en el fondo luminoso de la pantalla una sombra del objeto. Si se toma como objeto el cuerpo humano por ejemplo, los huesos, *opacos*, aparecen muy oscuros; las partes blandas, más *transparentes*, aparecen menos oscuras. De este modo se distingue claramente el esqueleto (fig. 959).

2º *Radiografía.* — Se reemplaza la pantalla fluorescente por una placa fotográfica colocada en un bastidor de madera, *cerrado o cubierto de papel negro* (porque estas substancias se dejan atravesar fácilmente por los rayos X). Cuando se revela la placa, — después de una exposición más o menos larga según el tubo y el manantial eléctrico empleados — aparece *impresionada* en la región que corresponde a la sombra de las partes opacas. Así se obtendría una verdadera *reproducción fotográfica* del cuerpo y de su esqueleto: esto es lo que llamamos una *radiografía*.

3º *Perfeccionamientos de los tubos de Crookes.* 1º *Tubos focos.*

— Si la región productora de los rayos X es extensa, las sombras así producidas están rodeadas de penumbras que oscurecen los contornos. Este inconveniente ha provocado un perfeccionamiento importante en los tubos de Crookes, el cual

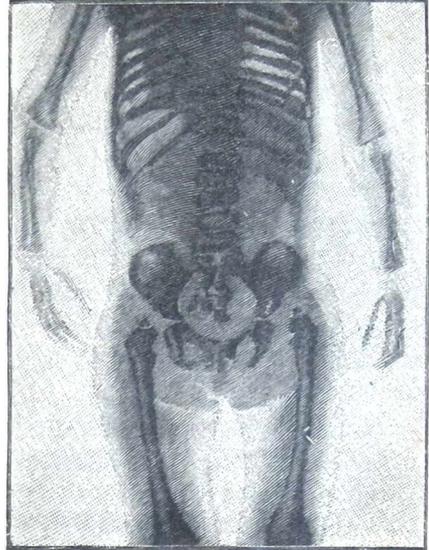


Fig. 959.

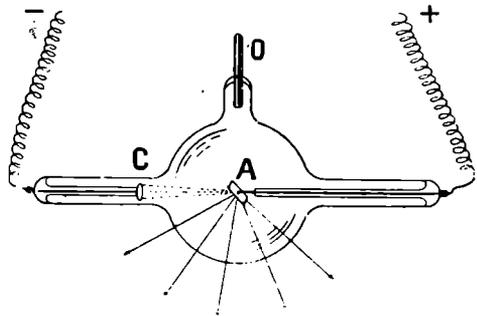


Fig. 960.

provocado un perfeccionamiento importante en los tubos de Crookes, el cual

consiste en usar un cátodo cóncavo C (fig. 960) que concentra los rayos catódicos en un anticátodo A formado de una placa de platino de pequeñas dimensiones, que constituye un manantial poco extenso de rayos X. Semejantes tubos llámense *tubos focos*.

2º *Osmo-regulador*. — Consiste en un tubo de platino O soldado a la ampolla, cerrado al exterior y abierto al interior del tubo. Esto constituye el *osmo-regulador* de Villard que obvia el inconveniente que sigue : al cabo de cierto tiempo de funcionamiento, al gas se enrarece cada vez más en el tubo, que la descarga atraviesa más difícilmente. Dícese que el tubo se vuelve *duro* *. Como el platino calentado al rojo es permeable al hidrógeno, si calentamos el tubo O en la llama de un mechero de gas, haremos que entre en la ampolla algo del hidrógeno de la llama y devolvemos al tubo sus propiedades primitivas.

969. **Aplicaciones de los rayos X.** — Los rayos X se aprovechan en radioscopia y radiografía. Sus aplicaciones más importantes se refieren a la medicina y cirugía. En efecto, por estos procedimientos, puede estudiarse fácilmente el esqueleto de un individuo vivo y reconocer los defectos y lesiones.

Asimismo, puede observarse la presencia de tubérculos en los pulmones, reconocer y localizar en los tejidos los cuerpos extraños, como, por ejemplo, los proyectiles.

También se ha intentado emplear los rayos X en el tratamiento de algunas enfermedades de la piel y hasta en el cáncer. Esta aplicación se domina *radioterapia*.

La experiencia ha demostrado que estos procedimientos sólo deben emplearse con prudencia, porque la prolongada aplicación de los rayos X puede provocar y ha provocado accidentes inflamatorios de suma gravedad.

970. **Transparencia de los cuerpos para los rayos X.** — Experimentos y leyes de Benoist. — Benoist y Hurmuzescu, y últimamente Benoist solo, han estudiado atentamente la transparencia de diversas materias para los rayos X.

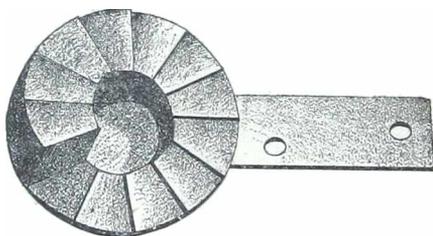


Fig. 961

En sus primeros experimentos establecieron que los rayos X, emitidos por una ampolla de Crookes, son una radiación compleja, experimentando en los cuerpos que atraviesan una absorción selectiva, porque su coeficiente de absorción disminuye a medida que aumenta el espesor total del cuerpo atravesado.

Benoist ha llamado *radiocroísmo* a esta propiedad. Los rayos dados por los tubos duros son más penetrantes que los de los tubos blandos. Las manifestaciones

del radiocroísmo dependen a la vez del origen de los rayos X empleados y de la naturaleza de los cuerpos atravesados, y que presentan grande analogía con la coloración más o menos compleja de los rayos luminosos y de los cuerpos transparentes.

Solo que, como los rayos X no pueden ser refractados ni difractados, tampoco pueden ser separados unos de otros por prismas ni redes. Se les puede distinguir indirectamente,

* Inversamento, llámase tubo *blando* al tubo en que no se ha extremado el vacío y a cuyo través pasa fácilmente la descarga.

gracias a su absorción desigual, por dos o más cuerpos bien escogidos. Con el radiocromómetro de Benoist (fig. 961), fundado en esta propiedad, se pueden conocer y definir de manera precisa las diversas especies de rayos X y otros similares.

Radiocromómetro. — Es un disco de plata rodeado de doce sectores de aluminio cuyo espesor crece de 1 a 12 milímetros (fig. 961). El aparato se coloca, ya en la placa radiográfica, ya contra la pantalla fluorescente. En la imagen, se observa cuál es el sector de aluminio que tiene el mismo color que el disco de plata; su orden o su número de espesor indica lo que se llama *grado radiocromométrico* de los rayos.

El conocimiento del grado radiocromométrico permite aplicar de modo racional los rayos X a la medicina y la cirugía.

Benoist ha establecido relaciones entre la naturaleza de los cuerpos y su mayor o menor opacidad para tal o cual especie de rayos X.

LEYES. — La opacidad específica de los cuerpos es independiente de su estado físico (sólido, líquido o gaseoso, cristalizado o amorfo), de su modo de agregación atómica o molecular (alotropía, polimería) y, finalmente, del estado de libertad o de combinación de sus átomos.

Dicha opacidad depende únicamente de los pesos atómicos y de las proporciones de los cuerpos simples constituyentes, la opacidad específica de los cuerpos simples es, a su vez, una función determinada, y generalmente creciente, de sus pesos atómicos.

Benoist aplicó estas leyes a la fijación de ciertos pesos atómicos y al análisis cualitativo de los compuestos y las mezclas.

La figura 962 representa la forma dada por Benoist al radioscopio para estas investigaciones de precisión. La pantalla fluorescente E, colocada horizontalmente, se ve por reflexión, en un espejo plano inclinado a 45°; también se puede, retirando el espejo, trasladar la pantalla a la pared de la caja negra opuesta a los bonetes B. El radioscopio se halla colocado en una caja metálica de gruesas paredes (fig. 963), para detener todos los rayos secundarios (971); los tipos de transparencia y los cuerpos que se quieren comparar sitúanse en una ranura practicada en la pared superior de esta caja metálica, debajo de la ampolla radiógena A (fig. 963).

971. Transformación de los rayos X por la materia. — **Experiencias de Sagnac.** — Este físico ha probado que toda materia que encuentran los rayos X, emite en todos sentidos nuevas radiaciones que él llama *rayos secundarios* o *rayos S*. Estos rayos poseen propiedades

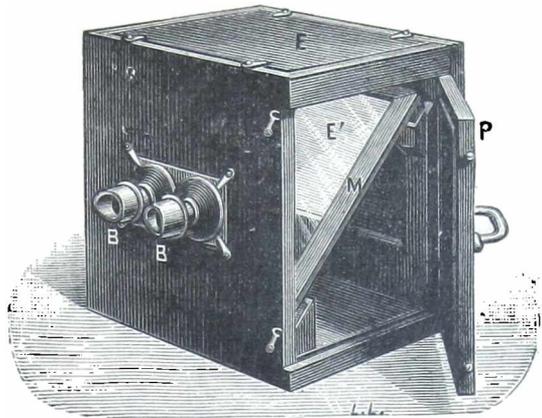


Fig. 962.

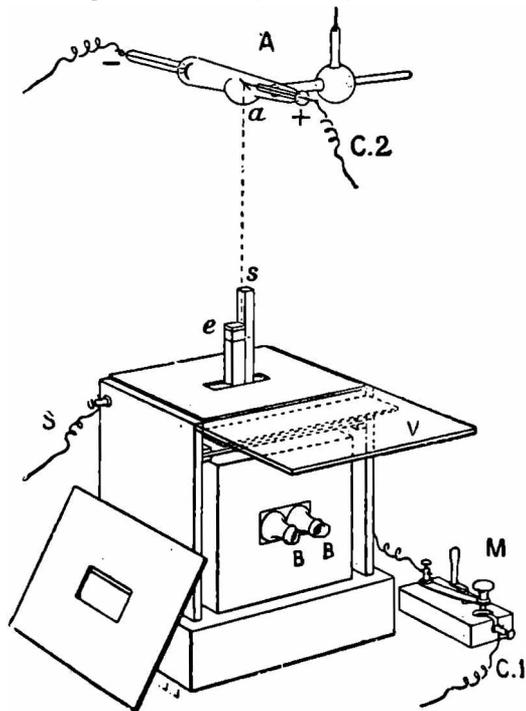


Fig. 963.

que toda materia que encuentran los rayos X, emite en todos sentidos nuevas radiaciones que él llama *rayos secundarios* o *rayos S*. Estos rayos poseen propiedades

casi análogas a las de los rayos X. Los recientes experimentos de Guilleminot y de Barkla han probado que por lo menos una parte de la radiación secundaria se debe a una simple difusión de los rayos X primarios, teniendo unos y otros las mismas propiedades. Pero al mismo tiempo se producen otros rayos cuyas propiedades difieren de la de los rayos primarios; éstos son los verdaderos rayos secundarios, y se les ha dado el nombre también de *rayos X fluorescentes*, por la analogía de este fenómeno con la fluorescencia. Únicamente los cuerpos de mucho peso atómico emiten estos rayos, y están caracterizados por su homogeneidad: forman un haz de poder penetrante definido, por lo menos en el hierro, el cobre, el cinc y otros elementos del mismo grupo. Los elementos de otro grupo (Ag, Sn, Sb, Ce) dan dos radiaciones fluorescentes; otros (Tu, Pt, Au, Bi) dan una radiación de apariencia menos homogénea aún, debido sin duda a una fuerte proporción de rayos difusos.

972. **Naturaleza de los rayos X.** — Todavía no está completamente determinada la naturaleza de los rayos X, sin embargo todas sus propiedades concuerdan con la hipótesis de que se deben a vibraciones del éter mucho más rápidas que las luminosas.

Blondlot ha establecido también que los rayos X se propagan en el aire *con la misma velocidad que las oscilaciones hertzianas*. Y, anteriormente, estableció que la velocidad de propagación, en el aire, de estas oscilaciones es igual a la de la luz.

Investigaciones de Marx, publicadas en 1906, conducen al mismo resultado.

973. **Ionización de los gases.** — *Los rayos X descargan los cuerpos electrizados.* — Esta propiedad ha sido descubierta por Benoist y Hurmuzescu y estudiada por varios físicos.

Perrin indicó que para ser descargados por los rayos X no hace falta que los conductores sean cortados por estos rayos. Así: un condensador se descarga cuando entre sus armaduras pasa un haz estrecho de rayos X, *que no los toque*. Podemos decir que *los rayos X vuelven al aire conductor*. Además, la conductibilidad comunicada al aire persiste cierto tiempo después de cesar los rayos X.

Los gases vueltos conductores de este modo donominanse *ionizados*. La propiedad de *ionizar* los gases pertenece también a los rayos de Lénard y de Becquerel (974).

También se desarrolla en otras varias circunstancias la conductibilidad de los gases: bajo la acción de los rayos ultravioletados que atacan a una placa de zinc; bajo la de una punta electrizada; en los gases que emanan de las llamas, etc.

Para explicar tal conductibilidad, supónese que en estos diversos casos, se dividen las moléculas de los gases en electrones negativos y en centros positivos. Además, esto nos induce a creer que cada centro cargado atrae a sí, por su acción electrostática, moléculas neutras; *el conjunto constituye lo que se llama un ion*. En efecto, Townsend ha demostrado que los *iones* se difunden en los gases más lentamente que las mismas moléculas gaseosas; luego deben ser más pesados que ellas.

La descarga de los cuerpos electrizados se explica del modo siguiente. Los iones positivos son atraídos por los cuerpos cargados negativamente y van a descargarlos; mientras que los iones negativos descargan los cuerpos positivos. Los movimientos se hacen siguiendo las líneas de fuerza del campo eléctrico, y con velocidades, más grandes para los iones negativos que para los positivos. Rutherford y Zeleny fueron los primeros en medir estas velocidades comparándolas con la velocidad conocida de una corriente gaseosa. De este modo se define la *movilidad de los iones*.

Cuando se abandona a sí mismo un gas ionizado, los centros cargados se vuelven a combinar a consecuencia de colisiones entre los iones, y desaparece la conductibilidad del gas.

Este fenómeno de la recombinación de los iones ha sido estudiado por Rutherford, Mac Clung, Langevin y Bloch.

Condensación de un vapor sobresaturado en un gas ionizado. — Cuando se producen iones en una atmósfera sobresaturada de vapor de agua (322), prodúcese inmediatamente la condensación del vapor en forma de niebla.

Experimentos de Wilson. — Wilson ha estudiado este fenómeno y ha demostrado que hace falta menor sobresaturación para producir la condensación por los iones negativos que por los positivos.

Numeración de los iones. — Thomson utilizó este fenómeno para determinar el número de iones contenidos en un volumen determinado de un gas ionizado. Supone que cada gotita de niebla formada tiene un ion por núcleo de condensación. De este modo, se determina la velocidad de caída de la niebla, lo cual permite calcular el diámetro de las gotitas. Se pesa el agua resultante de la caída de la niebla y así se puede calcular el número de gotas y, por consiguiente, el de iones. Como se puede medir la carga total de la niebla recogiéndola en una lámina metálica, de ahí se deduce la carga de cada electrón, encontrándola igual a la de un ion monovalente en la electrólisis.

CAPÍTULO II

RADIOACTIVIDAD*

974. **Reseña histórica.** — En el estudio de las radiaciones de la ampolla de Crookes, deben incluirse las radiaciones particulares emitidas por ciertos cuerpos y que han sido descubiertas por diversos físicos, a partir de 1896.

1º *Experimentos de Becquerel.* — Enrique Becquerel demostró, en 1896, que el uranio y sus sales emiten rayos especiales, capaces de atravesar cuerpos opacos, de excitar la fluorescencia, de impresionar placas fotográficas y del volver conductores a los gases.

2º *Propiedades del torio, radio, polonio y actinio.* — La señora Curie, en Francia, y Schmidt, en Alemania, demostraron que los compuestos del torio se conducen como los del uranio.

Luego, los esposos Curie descubrieron dos metales, el *polonio* y el *radio*, que existen en cantidad extremadamente pequeña en la pechblenda de Joachimsthal, y que emiten una irradiación sumamente intensa.

* Este capítulo ha sido redactado con la colaboración de M. Debierno.

Después, se ha descubierto cierto número de otras sustancias que poseen igual propiedad; pero cuya individualidad ha sido más o menos bien caracterizada. Entre ellas, debe citarse en primera línea el *actinio*, debido a Debiérne, que existe en la pechblenda en cantidad menor aún que el radio; el *ionio*, descubierto por Rutherford y Boltwood; el *radiotorio*, descubierto por Hahn. De todos estos cuerpos, el único que se ha podido caracterizar claramente cómo elemento nuevo, ha sido el radio.

Su propiedad común de emitir una radiación se denomina *radioactividad*. Y los mismos cuerpos se llaman también *radioactivos*.

975. **Diversos efectos de la radiación del radio.** — 1º *Efectos fotográficos y químicos.* — Los efectos fotográficos del radio pueden utilizarse para producir radiografías; pero son menos claras que con los rayos X, a causa de la difusión de los rayos de radio. Por otra parte, estos rayos son mucho más penetrantes; así, atraviesan lo mismo los huesos que los tejidos blandos.

La radiación del radio produce acciones químicas muy diferentes. Berthelot ha demostrado que esta radiación descompone el anhídrido yódico y el ácido nítrico como hace la luz. Becquerel ha obtenido la transformación del fósforo blanco en fósforo rojo, etc. Cerca de una sal de radio, se ozoniza el oxígeno del aire. Finalmente, una sal de radio disuelta en agua, la descompone lentamente, dando una mezcla de hidrógeno y oxígeno (gas detonante).

2º *Efectos de fosforescencia y de coloración.* — Muchas sustancias se vuelven fosforescentes en las inmediaciones de una sal de radio, principalmente los sulfuros alcalino terrosos, la blenda de Sidot, los platino-cianuros. Las mismas sales de radio se vuelven luminosas de modo muy vivo.

Bajo la acción de la radiación del radio, se coloran muchos cuerpos: el vidrio adquiere matices oscuros o violados; el cuarzo transparente se convierte en cuarzo ahumado, etc., la misma sal de radio se colora. El profesor Bordas ha demostrado muy recientemente que la acción de una sal de radio puede modificar y embellecer los colores de ciertas piedras preciosas*.

Efectos fisiológicos. — Se han estudiado las acciones del radio en los vegetales, cuyas hojas se vuelven amarillas (Giesel), en los granos, cuyas facultades germinativas quedan destruidas (Matout). Bohn ha dirigido la radiación del radio a animales en vías de crecimiento. Ha visto producirse varios efectos (producción de monstruos, disminución del crecimiento) que, a menudo, sólo aparecen mucho tiempo después de cesar la acción del radio.

En los tejidos animales, el radio produce quemaduras graves, a

* Las piedras llamadas *aluminides*, corindón, zafiro, etc., que son alúmina cristalizada, tienden hacia el color amarillo. Así, un zafiro azulado adquiere sucesivamente los colores verde, después amarillo claro y luego amarillo obscuro; un zafiro rojo se vuelve violado, después azul, luego verde y por fin amarillo. Parece, pues, que las aluminides se transforman en topacio por la acción del radio. En la naturaleza, los topacios son más abundantes que las otras aluminides; es verisímil que esto proviene de la acción lenta de substancias radioactivas.

causa del poder penetrante de sus rayos. Estas quemaduras se manifiestan a veces algunas semanas después de cesar la acción del radio. Los productos muy activos deben encerrarse siempre en envolturas metálicas muy espesas.

Se ha tratado de aplicar el radio a la terapéutica (*radioterapia*). El doctor Danlos ha obtenido buenos resultados en el lupus; el Dr Wickam parece que ha conseguido curar el cáncer superficial por la radiación del radio.

976. **Medida de la radioactividad.** — La radioactividad de una sustancia se mide principalmente por su propiedad de descargar los cuerpos electrizados, o más bien, de ionizar el aire. El aparato más sencillo para medir la radioactividad es el electroscopio de Curie y Laborde. La hoja de oro o de aluminio batido F, colocada en una caja metálica C' (fig. 964) está fija a un platillo metálico, en comunicación con un vástago aislado A, que pasa por una abertura de la caja, y con un platillo P, situado en una caja interior C'. Se carga la hoja por medio del vástago A, cubierto con una tapadera.

Introdúcese la substancia radioactiva en un platillo que forma el fondo de C'. Así se ve que la hoja baja gradualmente, y se observa este movimiento con un microscopio pequeño provisto de un micrómetro, y se determina la duración del movimiento entre dos divisiones fijas. Se puede proceder con

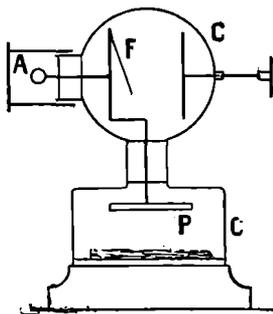


Fig. 964.

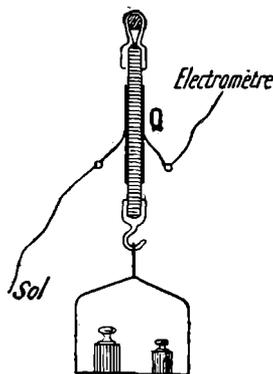


Fig. 965.

mayor precisión reemplazando el electroscopio por un electrómetro de cuadrantes y compensando la pérdida de carga debida a la ionización por una producción correspondiente de electricidad, que se mide y regula de manera que permanezca constante la desviación del electrómetro. Para producir así una carga conocida se utilizan los fenómenos del *Piezo-electricidad*, estudiados por J. y P. Curie. Se toma una lámina de cuarzo (fig. 965) tallada paralelamente al eje y perpendicularmente al eje de simetría binaria que da por resultado una arista en la que se desarrollan las facetas hemiedras. Se platean las caras de esta lámina, y en estas condiciones, cuando se ejerce una tracción en la lámina, las capas de plata se cargan de cantidades iguales de electricidades contrarias. La cantidad de electricidad desarrollada de este modo en una cara es proporcional a la tracción ejercida. Esta lámina de cuarzo así preparada se llama *cuarzo piezo-eléctrico*; basta colgar de él un peso conocido para sacar cantidades de electricidad también conocidas.

977. — **Caracteres de la radioactividad.** — **Preparación del radio.** —

Uno de los caracteres fundamentales de la radioactividad es la *espontaneidad*. Diferentes acciones químicas (oxidación del fósforo, por ejemplo), pueden comunicar a un cuerpo la propiedad de producir fenómenos de fosforescencia y de ionizar los gases; pero se distinguen de la radioactividad por la intervención de causas ajenas al cuerpo. Por el contrario, los fenómenos de radioactividad son espontáneos, y hasta ahora nadie ha sabido ni retardarlos ni acelerarlos. La elevación de temperatura, que tanto influye en las reacciones químicas, no ejerce ninguna influencia en la radioactividad.

Otro carácter de la radioactividad es ser una *propiedad atómica*. Este fenómeno fué descubierto, primero, por la señora Curie en el uranio y el torio : la radioactividad de una substancia que contenga uranio o torio es proporcional a la cantidad de estos elementos contenida en la substancia estudiada.

La demostración de esta propiedad es la que ha conducido al descubrimiento de los elementos radioactivos nuevos.

Además, ha hallado que ciertos minerales de uranio (pechblenda, calcolita) eran más radioactivos de lo que podía hacer prever la cantidad de uranio que contienen.

Los esposos Curie emitieron entonces la hipótesis de que este aumento de radioactividad debía consistir en la presencia, en el mineral de uranio, de cuerpos más intensamente radioactivos que el uranio mismo, y trataron de aislar estos cuerpos. De este modo, por una serie de separaciones químicas y de cristalizaciones fraccionadas, llegaron, en colaboración con Bemont, a aislar las sales de los dos cuerpos nuevos que llamaron *polonio* y *radio*, siendo éste el más importante. Como el radio existe en proporción excesivamente pequeña en la pechblenda (unos 0,2 gr. por tonelada) su separación es larguísima y penosa. Esto no obstante, los esposos Curie consiguieron preparar las sales de radio puras, cuyas propiedades son parecidas a las de los compuestos del bario.

La prueba de la individualidad propia del radio ha sido dada por los experimentos espectrocópicos de Demarçay. Estudiando el espectro de las sales de bario radíferas, ha visto, a medida que a causa del tratamiento se volvía cada vez más rica en radio la sal, sustituir al espectro de bario un espectro completamente nuevo, que caracterizaba el radio. La señora de Curie ha determinado el peso atómico del radio y lo ha fijado en 226,4.

Preparación del radio metálico. — El radio metálico fué preparado en 1910 por la señora Curie y M. Debierne, sirviéndose del método siguiente que Guntz había aplicado ya para la preparación del bario. Se prepara una amalgama de radio haciendo la electrólisis de una disolución de cloruro de radio puro con un cátodo de mercurio, y la amalgama es transportada rápidamente a una cajita de hierro colocada en un tubo de cuarzo; se destila a 700° en una atmósfera de hidrógeno y el radio queda en forma de un betún blanco brillante.

El radio metálico se ennegrece inmediatamente al aire, sin duda por

la formación de un nitruro: descompone el agua como el bario. Se ha observado que su radioactividad tiene el valor que era de prever según la de sus compuestos.

978. **Naturaleza de la radiación del radio.** — Como una sal de radio es varios millones de veces más radioactiva que el uranio, produce una radiación que se puede estudiar fácilmente.

Esta radiación es compleja y comprende tres especies de rayos : rayos α , rayos β y rayos γ . Todos ellos ionizan los gases, impresionan las placas fotográficas, excitan la fosforescencia y atraviesan los cuerpos opacos; pero en grados más o menos grandes.

Estos rayos pueden ser en cierto modo separados por la acción de un campo magnético. Supongamos que se coloque un trozo de sal de radio en una cavidad estrecha y profunda practicada en un bloque de plomo R (fig. 966). Del orificio saldrá un haz estrecho de rayos. Si se coloca el sistema en un

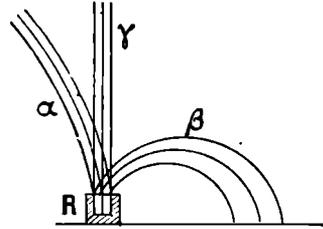


Fig. 966.

campo magnético, perpendicular al plano de la figura y dirigido de delante atrás, el haz de rayos se divide en tres haces α , β , γ .

Rayos α . — Los rayos α están muy poco desviados hacia la izquierda. Su desviación que se había creído nula, fué puesta en evidencia por Rutherford. El sentido de esta desviación está de acuerdo con la hipótesis de que son debidos a corpúsculos cargados positivamente. Por lo tanto, son análogos a los rayos-canales de Goldstein. Además, están desviados por un campo eléctrico, en un sentido conforme con esta hipótesis.

Se puede demostrar esta carga de los rayos α por el experimento siguiente. Se coloca una sal de radio en una ampolla puesta en un tubo A metalizado exteriormente, al cual se fija una hoja de oro f (fig. 967).

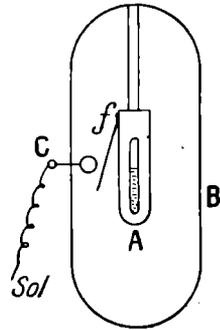


Fig. 967.

Se pone todo esto en un recipiente B, vacío de aire (para evitar la ionización), protegido eléctricamente por una pantalla de rejilla metálica. En frente de la hoja f hay un conductor C en comunicación con el suelo. Así se ve que la hoja de oro se aparta progresivamente de A por causa de la carga que toma bajo la influencia de los rayos α ; la hoja toca el conductor C, se descarga y cae; y así se reproducen indefinidamente los mismos fenómenos, y persistirían durante la vida del radio.

Las medidas de las desviaciones magnética y eléctrica, así como otros varios experimentos, han permitido determinar la masa de las partículas, su velocidad y su carga. Hoy está probado con toda certeza que los rayos α son átomos de helio cargados positivamente, y que tienen una velocidad del orden de 20 000 km. por segundo.

Los rayos α son muy poco penetrantes; son absorbidos por algunos

centímetros de aire y por $\frac{1}{30}$ de milímetro de aluminio. Cuando se encierra una sal de radio en un vaso de vidrio, los rayos α no pueden salir. A esto se debe de atribuir la electrización positiva espontánea de una sal de radio puesta en un tubo de vidrio cerrado; fenómeno que descubrieron los esposos Curie.

Los efectos de fosforescencia que producen los rayos α se manifiestan especialmente en el sulfuro de cinc. A esta fosforescencia se debe el curioso efecto producido en el aparatito llamado *espartariscopio* imaginado por Crookes. Se pone un fragmento de sal de radio cerca de una pantallita de sulfuro de cinc. Visto con la lente se descubre una sucesión de puntos brillantes que aparece y desaparece : representan los puntos de llegada de las partículas α .

Rayos β . — Los rayos β , a juzgar por el sentido de su desviación en un campo magnético y también en un campo eléctrico, deben de ser atribuidos a corpúsculos cargados negativamente. Por lo tanto, son análogos a los rayos catódicos; pero son mucho más penetrantes (atraviesan 1 cm. de aluminio). Han sido descubiertos casi simultáneamente por Giesel, Meyer, von Schweidler, Becquerel y Kauffmann. Estos físicos han demostrado que el haz de rayos β es compuesto. Al mismo tiempo que desviado, es disperso por un campo magnético en una infinidad de rayos desigualmente desviados y penetrantes.

El gran poder penetrante de estos rayos se debe sin duda a la enorme velocidad de los corpúsculos. Esta velocidad se ha podido medir por la comparación de su desviación en un campo magnético y en un campo eléctrico; y da, al mismo tiempo, la velocidad, que se acerca mucho a la de la luz, y la relación entre la carga y la masa que resulta ser más pequeña que en los rayos catódicos*.

P. Curie ha demostrado directamente que los rayos β transportan cargas negativas. Para esto los hacía atravesar una lámina de aluminio, que rodeaba un bloque de parafina en el cual se hallaba una placa de plomo en relación con un electroscopio. Entonces, éste se cargaba negativamente.

Rayos γ . — Los rayos γ han sido descubiertos por Villard. No son desviados por un campo magnético y son completamente análogos a los rayos X, aunque mucho más penetrantes que éstos (se necesitan varios centímetros de plomo para absorberlos).

979. Calor desprendido por los cuerpos radioactivos. — P. Curie y Laborde han demostrado que las sales de radio emiten continuamente una cantidad relativamente considerable de calor, unas 120 calorías por hora y por gramo de radio.

* Este fenómeno se explica en las teorías modernas de la materia debidas a Lorentz Larmor, Abraham, y que suponen que la materia es de origen eléctrico. Según esta hipótesis, la masa de un corpúsculo no debe de ser una magnitud constante; sino que dependerá de la velocidad del corpúsculo. De este modo, según Max Abraham, la energía del corpúsculo no puede considerarse como proporcional al cuadrado de la velocidad, a no ser para velocidades pequeñas. Cuando la velocidad tiende a la de la luz, la energía cinética tenderá hacia el infinito.

Este desprendimiento de calor fué demostrado primeramente colocando una sal de radio en un vaso de aire líquido que la aislaba térmicamente. De este modo se calentaba espontáneamente.

Otro experimento más sorprendente consistió en introducir un fragmento de sal de radio en un tubo cerrado, en medio de una masa de hidrógeno líquido contenida en un vaso de aire líquido rodeado también de hidrógeno líquido. La sal de radio produce una vaporización continua del hidrógeno, lo cual prueba que aun a -250° desprende una cantidad de calor igual a la que desarrolla en las condiciones ordinarias de temperatura.

970. Teoría de la radioactividad. — Transformación de los cuerpos radioactivos. — La teoría de los fenómenos de la radioactividad tiene por base una hipótesis enunciada por los esposos Curie cuando empezaron a estudiarlos. Supusieron que la energía desprendida por las substancias radioactivas puede ser tomada a la misma substancia. Por consiguiente, ésta debe transformarse en otra substancia. Los fenómenos de la radioactividad son los que acompañan estas transformaciones o *transmutaciones* de los átomos.

Esta hipótesis ha sido confirmada por el descubrimiento de los fenómenos de *radioactividad temporal*, llamados primero por Curie fenómenos de *radioactividad inducida*, que consisten en los hechos siguientes.

Con las substancias radioactivas como el radio, cuya actividad parece constante, es posible producir en otros cuerpos fenómenos de radioactividad, cuya intensidad disminuye lentamente con el tiempo. Por ejemplo, si se ponen varios cuerpos cerca de una sal de radio, de torio o de actinio, la superficie de estos cuerpos se vuelve radioactiva, y esta actividad disminuye más o menos rápidamente (desaparece enteramente a las pocas horas). Además, la misma atmósfera gaseosa que rodea al radio, al torio o al actinio, se vuelve radioactiva. Estas radioactividades temporales obedecen a veces a leyes de decrecimiento complejas que caracterizan varias especies diferentes de radioactividad sucediéndose unas a otras. Cada especie está caracterizada por su rapidez de decrecimiento y por su radiación.

Rutherford y Soddy, desarrollando la idea que había guiado al descubrimiento del radio, emitieron la hipótesis de que cada especie de radioactividad temporal caracteriza un nuevo átomo radioactivo, que se destruye al transformarse en otro, y así sucesivamente.

Los fenómenos que produce el radio se interpretan como sigue :

1^o Emanación del radio. — El átomo de radio, que emite una partícula α , produce una *emanación* radioactiva, a la cual se ha atribuido la actividad del gas que rodea al radio. Se ha demostrado perfectamente la existencia real de esta emanación; la cual ha sido aislada por sir Ramsay, utilizando su propiedad de condensarse a la temperatura del aire líquido. Y hasta se ha podido obtener la emanación en estado puro, y ha sido determinado su espectro, que caracteriza perfectamente un elemento nuevo. La radioactividad de la emanación disminuye más lentamente que la de los

cuerpos que han adquirido la radioactividad inducida, y no desaparece completamente hasta un mes después.

2° *Descendencia del radio.* — La emanación produce depósitos que comunican a los cuerpos la radioactividad inducida y que son considerados como nuevos elementos que resultan de la transmutación de la emanación. En estos depósitos ha sido posible identificar una serie de estados que han recibido los nombres de *radio A*, *radio B*, *radio C*, que se suceden y se destruyen con gran rapidez.

Después del *radio C* aparecen una serie de términos caracterizados por una rapidez decreciente más pequeña, llamados *radio D*, *radio E*₁, *radio E*₂, *radio F*. Rutherford ha demostrado que *el radio F es idéntico al polonio**. Por fin, éste último desaparece poco a poco; según los experimentos de la señora Curie y Debierne, hay motivos para pensar que entonces se transforma en plomo.

3° *Ley del decrecimiento de la actividad.* — La ley, conforme a la cual la actividad de un cuerpo se debilita con el tiempo, es muy sencilla: *La actividad de un elemento disminuye en una mitad en tiempos sucesivos iguales.* El tiempo necesario para producir esta disminución en la radioactividad caracteriza el elemento considerado, y permite también calcular lo que se llama la *vida media* de este elemento (tiempo medio que tarda un átomo en desaparecer). Estas constantes difieren mucho de un elemento a otro ($\frac{1}{500}$ de segundo a varios millones de años para la vida total, como lo demuestran los cuadros siguientes relativos a los diversos elementos radioactivos). Para los elementos de vida sumamente larga, sólo se han podido determinar por métodos indirectos. Así se ha demostrado que la *vida media del radio es de unos de 2 900 años.*

4° *Origen del radio.* — Como el radio se destruye continuamente, se debe admitir que, en los minerales que lo contienen, se reforma sin cesar a expensas de otro cuerpo radioactivo. Y encontrándose siempre el radio en los minerales de uranio, parece natural admitir que el uranio es el que se transforma en radio. Pero ha sido imposible demostrar este hecho por experimentos directos. Así es que se ha llegado a suponer que la filiación del uranio al radio no es directa, y que entre ellos se forman tres cuerpos por lo menos: el *radio-uranio*, el *radio X* y el *ionio*. Luego el uranio parece ser el jefe de una familia de cuerpos radioactivos, que comprende el radio y sus descendientes.

5° *Diversos cuerpos familias de los radioactivos.* — El torio y el actinio

* *Preparación del polonio.* — El polonio existe en pequeñísima cantidad en los minerales radioactivos (0,1 mmgr. por tonelada de pechblenda). Para preparar el polonio la señora Curie y Debierne operaron con algunas toneladas de mineral de uranio, tratado por el ácido clorhídrico. Este ácido disolvió el polonio sin tocar al radio. Los 200 gramos del producto obtenido por su acción, después de una larga serie de tratamientos químicos, terminados con una electrólisis, dieron 2 mmgr. de polonio impuro. El espectro de este cuerpo resulta complicado por causa de la presencia de metales extraños; pero presenta rayas características, que se atenúan a medida que decrece la actividad del polonio.

deben ser considerados como los primeros términos de otras dos familias de cuerpos radioactivos sucediéndose los unos a los otros.

El conjunto de nuestros conocimientos sobre los cuerpos radioactivos está comprendido en los tres cuadros p. 801, 802, que se refieren a las familias del uranio, del torio y del actinio :

A estos elementos conviene agregar : el *potasio* (K = 39) y el *rubidio* (Rb = 85, 1,) que emiten rayos β .

981. **Producción del helio a partir de los elementos radioactivos.** — **Relaciones entre los pesos atómicos de estos elementos.** — La hipótesis de la transmutación de los elementos, que permite explicar los fenómenos de radioactividad, está confirmada también por los experimentos de Ramsay y Saddy, que han puesto en evidencia el hecho siguiente : *cuando se abandona a si misma la emanación del radio, se transforma en helio*; el espectro propio de la emanación desaparece, y a la vez aparece el del helio. Asimismo, Debierne ha demostrado que una sal de radio produce una cantidad de helio propor-

FAMILIA DEL URANIO.

SUBSTANCIAS	VIDA MEDIA	RAYOS	RECORRIDO DE LOS RAYOS (en cm)	OBSERVACIONES
Uranio.	9×10^8 años.	α	2,7	Peso atómico, 238,5
↓ Radio-uranio . . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .	. . . . .
↓ Uranio X.	35,5 días.	β, γ	. . . . .	. . . . .
↓
↓ Ionio	5×10^8 años.	α	2,8	. . . . .
↓
↓ Radio	2 900 años.	α, β	3,5	Peso atómico, 226,5
↓ Emanación del radio.	5,5 días.	α	4,2	Gaz inerte.
↓ Radio A.	4,3 minutos.	α	4,8	. . . . .
↓ Radio B.	38,5 minutos.	β	. . . . .	. . . . .
↓ Radio C ₁	28,1 minutos.	α, β, γ	7,06	. . . . .
↓ ↓ Radio C ₂	2 minutos.	β	. . . . .	. . . . .
↓ Radio D.	21 años (?)	β	. . . . .	. . . . .
↓ Radio E.	6,9 días.	β	. . . . .	. . . . .
↓ Radio F (o polonio)	202 días.	α	3,8	. . . . .
↓ ?

FAMILIA DEL TORIO.

SUBSTANCIAS	VIDA MEDIA	RAYOS	RECORRIDO	OBSERVACIONES
Torio	4×10^{10} años.	α		Peso atómico, 232
↓				
<i>Mesotorio</i> 1	7,9 años.			
↓				
<i>Mesotorio</i> 2	8,9 horas.	β, γ		
↓			3,9	
<i>Radiotorio</i>	2,9 años.	α		
↓			5,7	
<i>Torio</i> X	5,25 días.	α, β		
↓			5,5	
<i>Emanación del torio</i>	76 segundos.	α		Gas inerte.
↓				
<i>Torio</i> A	0,2 segundo.	α		
↓				
<i>Torio</i> B	15,3 horas.	β		
↓				
<i>Torio</i> C ₁	7,9 minutos.	α	5,0	
↓				
<i>Torio</i> C ₂	?	α	8,6	
↓				
<i>Torio</i> D	4,5 minutos.			
↓				
?				

FAMILIA DEL ACTINIO.

SUBSTANCIAS	VIDA MEDIA	RAYOS	RECORRIDO	OBSERVACIONES
Actinio	?			Grupo de tierras raras.
↓				
<i>Radio-actinio</i>	28,1 días.	α, β	4,8	
↓				
<i>Actinio</i> X	15 días.	α	4,5	
↓				
<i>Emanación del actinio</i>	5,6 segundos.	α	5,8	
↓				
<i>Actinio</i> A	0,002 segundos.	α	6,5	
↓				
<i>Actinio</i> B	52,1 minutos.	β		
↓				
<i>Actinio</i> C	2,15 minutos.	α	5,5	
↓				
<i>Actinio</i> D	7,2 minutos.	β, γ		
↓				
?				

cionada al tiempo. La mayor parte de los otros elementos radioactivos, especialmente el actinio, producen también el helio.

La producción del helio por las sustancias radioactivas está en relación directa con la emisión de las partículas α , lo cual está muy de acuerdo con el hecho de que los rayos α son átomos de helio.

Si, ahora, se supone que cada vez que un átomo radioactivo se transforma en otro elemento, perdiendo una sola partícula α , de ahí se deduce que el peso atómico del segundo elemento debe ser igual al del primero, menos el peso atómico del helio, que es 4. De modo que siendo el peso atómico del radio 226,5, el de la emanación debe ser $226,5 - 4 = 222,5$. Y así, de uno en otro, se ha llegado a los resultados siguientes: *radio A*, = 218,5; *radio B* = 214,5; *radio C* = 214,5 (no emitiendo el *radio B* rayos α); *radio D* = 210,5; *radio E* = 210,5 (no emitiendo el *radio D* rayos α); *radio F* o *polonio*, 210,5 (no emitiendo el *radio E* rayos α). El elemento desconocido que sucede al polonio debería tener un peso atómico $210,5 - 4 = 206,4$. Este es, pues, precisamente el peso atómico del plomo; de ahí viene la idea de que el plomo es el último término de la familia del uranio. Esta hipótesis ha sido confirmada por el hecho de que, en los experimentos del polonio la señora Curie y Debierne han observado que las rayas del plomo aumentan de intensidad, a la vez que desaparecen las del polonio.

982. **Origen de la energía que emiten los cuerpos radioactivos.** — El desprendimiento de calor, o como se dice generalmente de energía, que acompaña la radioactividad, se explica por la desagregación (o *desintegración*) de los átomos de los elementos radioactivos. Por eso debe admitirse que cada átomo posee en sí mismo una energía considerable: calculase, en efecto, que en su vida entera, un gramo de radio puede dar tres mil millones de calorías, que es con corta diferencia el calor dado por la combustión de una tonelada de hulla.

Consecuencias. — La presencia de una pequeña cantidad de radio en las rocas puede compensar la pérdida de calor que sufre el globo terrestre y evitar su enfriamiento. Por otra parte, se ha calculado que bastaría que hubiese en el sol 1 gramo de radio por metro cúbico para dar todo el calor que radia este astro.

983. **Radioactividad de diversos cuerpos.** — Las primeras investigaciones han demostrado que, entre los minerales, solos los compuestos del uranio y del torio tienen notable radioactividad. Después, empleando aparatos sumamente sensibles, se ha descubierto la presencia de sustancias activas en gran número de materias.

Uno de los resultados más interesantes es el que se ha obtenido con las aguas minerales y el lodo medicamentoso. Las profundas investigaciones de la señora Curie y Laborde han demostrado que la mayor parte de las aguas minerales contienen, sea pequeñas cantidades de radio, sea emanación del radio. Se ha atribuido la acción curativa energética de ciertas aguas minerales, tomadas a la salida misma del manantial, a la emanación que contienen y que desaparece rápidamente.

Además, Moureu ha probado que en esas aguas hay helio, neón y argón, que acompañan constantemente la emanación. Esta se ha observado también, en cantidad mensurable, en la atmósfera y en el mar. Strutt ha puesto en evidencia la presencia del radio y del helio en la mayor parte de los minerales, y ha tratado de calcular la edad de las rocas según la cantidad de helio ocluso que contienen y que él supone provenir de la desintegración de los cuerpos radioactivos. Así ha encontrado unos 400 millones de años para las rocas de más edad; resultado que también han encontrado ciertos geólogos por medio de otras consideraciones.

984. **Patrón del radio.** — En gran número de investigaciones fundamentales en radioactividad, es necesario conocer con exactitud la cantidad de radio utilizado en los experimentos (ejemplos: medida del volumen de la emanación en equilibrio con el radio; determinación de la relación entre el radio y el uranio en los minerales; numeración de las partículas α , de donde se puede deducir la vida media del radio, etc.).

Los trabajos efectuados en los diferentes laboratorios presentaban dificultades en sus resultados, que no podían provenir sino de la apreciación inexacta de la cantidad de radio utilizado en los experimentos.

En fin, las aplicaciones medicinales del radio, que se van extendiendo, cada vez más, han provocado el desarrollo de una industria para la fabricación del radio. Este constituye la materia más costosa que pueda ser objeto de un comercio (400 000 francos el gramo de bromuro, sea unos 750 000 francos el gramo de radio metal contenido en preparaciones concentradas). Por consiguiente, los minerales de radio han adquirido grandísimo valor, y, por tanto, es necesario saber apreciar exactamente la cantidad de radio que contienen.

Se han utilizado varios métodos de medida con el fin de hacer esas determinaciones.

La comparación entre diferentes muestras, que contengan radio en estado concentrado o se puede hacer, de una manera precisa, por la medida de la ionización producida, bajo la influencia de los rayos γ , en un aparato a propósito, utilizando la misma fracción de la radiación para las diferentes muestras. Además, para conocer, en valor absoluto, la cantidad de radio contenido en una muestra, es preciso poder compararla a una preparación, que servirá de patrón y que contendrá una masa exactamente conocida de sal de radio puro.

Pero se presentan grandes dificultades para establecer semejante patrón. Primero hay que preparar una sal de radio, absolutamente puro (pureza que se verifica por el análisis espectral y por la determinación del peso atómico), después tomar una cantidad exactamente conocida y pesada con gran precisión, porque la cantidad utilizada rara vez pasará de 20 mmgr. Por fin, se debe encerrar la sal en una ampolla de vidrio cerrada, tomando todas las precauciones necesarias para que pueda conservar una radiación fija y determinada. Este trabajo no podía ser llevado a cabo sino por hombres de ciencia, muy experimentados en este género de investigaciones y que pudieran disponer de una cantidad relativamente importante de sal de radio para poder llevar muy lejos la purificación.

El congreso de Radiología verificado en Bruselas en 1910 nombró una comisión con el fin de establecer un patrón internacional de radio. La comisión fué compuesta de sabios que ya habían efectuado investigaciones muy importantes en radioactividad (Francia : la señora Curie y M. Debicrne; Inglaterra : Rutherford y Soddy; Alemania : Hahn y Geitel; Austria : Stephan Meyer y Von Schweidler; Estados Unidos : Eve y Boltwood).

La comisión pidió a la señora Curie que tuviera a bien encargarse de la preparación del patrón internacional, por ser ella la más designada por sus trabajos en la preparación de las sales de radio y en la determinación del peso atómico de este elemento. Esta estableció un patrón formado de 0,02199 gramo de cloruro de radio absolutamente puro, contenido en un tubito de vidrio cerrado. La sal ha sido perfectamente desecada ; pues, en efecto, el agua, descompuesta por la acción de los rayos, hubiera podido dar gas detonante capaz de hacer estallar la ampolla por su presión. Los rayos electrizados pueden dar lugar a chispas capaces de romper el vidrio, pero esta eventualidad se ha evitado soldando a la ampolla un alambre de platino, que pone en comunicación el interior con el exterior. La preparación de este patrón fué terminada en agosto de 1911.

Por otra parte, el Instituto del radio de Viena, que dispone de grandes cantidades de este cuerpo, preparó varias ampollas conteniendo una masa conocida de radio, que pueden servir de patrón. La comisión decidió efectuar comparaciones entre esas ampollas y la que había preparado la señora Curie para conocer el grado de precisión a que se podía llegar en estas delicadas manipulaciones. Con este fin, la comisión, casi completa, se reunió en París en marzo de 1912. Se habían instalado aparatos de medida en una sala fuera del laboratorio de Radioactividad, para evitar todo error que pudiera provenir de la presencia de polvos radioactivos.

Las medidas efectuadas por los diferentes miembros de la comisión, con diversos aparatos, algunos de los cuales habían sido traídos por los miembros extranjeros, probaron perfecta concordancia entre las ampollas de Viena y la de la señora Curie.

En consecuencia de los experimentos, que dieron plena confianza en los métodos empleados para establecer un patrón, la comisión decidió adoptar definitivamente la ampolla preparada por la señora Curie como patrón internacional. Este ha servido después para preparar patrones secundarios destinados a los diferentes laboratorios, y ha sido depositado en la Oficina internacional de Pesas y Medidas en condiciones especiales de seguridad.

Hay que advertir que, teniendo en cuenta la transformación progresiva del radio, será preciso, dentro de unos veinte años, establecer un nuevo patrón, si no, habrá que tener presente la pequeña pérdida de radio que haya desaparecido espontáneamente y que haya sido reemplazada por un elemento inactivo (el plomo acaso).

CAPÍTULO III

OSCILACIONES ELÉCTRICAS

985. — **Descarga oscilante.** — Generalmente, la descarga de un condensador no es una corriente continua; sino que se compone de una serie de descargas que se producen alternativamente en un sentido y en el contrario, con intensidades que decrecen rápidamente.

Este fenómeno puede observarse por medio del espejo giratorio de Wheatstone, que consiste, en principio, en producir la chispa junto a un espejo cóncavo que gira rápidamente. Feddersen que proyectó de este modo una imagen real de la chispa en una placa fotográfica, descubrió que la imagen fotográfica no se presenta siempre en forma de *banda continua*, como sucedería si la chispa fuera un trazo de fuego

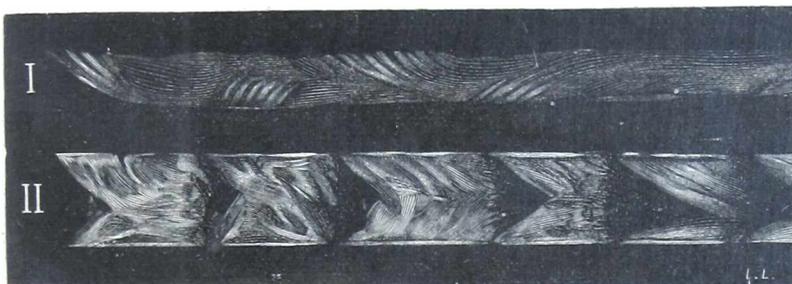


Fig. 968.

continuo y de cierta duración. La mayor parte del tiempo la imagen es discontinua y está formada por trazos alternativamente gruesos y desplegados en cada polo (fig. 968). Esto indica que hay una serie de descargas sucesivas, en que cada polo es alternativamente positivo y negativo. Exprésase este fenómeno, diciendo que la descarga es *oscilante*.

El intervalo de tiempo que separa dos descargas sucesivas es, por otra parte, extremadamente corto, por ejemplo, de una millonésima de segundo, o 10, 100, 1 000 veces menor todavía.

Semejante fenómeno se produce cuando la descarga atraviesa conductores gruesos y cortos. Por el contrario, la descarga aparece continua si recorre alambres metálicos largos y delgados o columnas líquidas, es decir, circuitos de gran resistencia eléctrica. En este caso, la imagen fotográfica producida por el espejo cóncavo es una *banda continua*.

Puede demostrarse que este fenómeno es debido a la self-inducción (844) del circuito de descarga; el período de las oscilaciones es tanto mayor cuanto más enrollado sobre sí mismo se halla el circuito,

esto es, cuanto más grande es su self-inducción; además, crece con la capacidad del condensador*.

El fenómeno es análogo al que se produce si se reúnen dos vasos que contengan agua a diferente nivel.

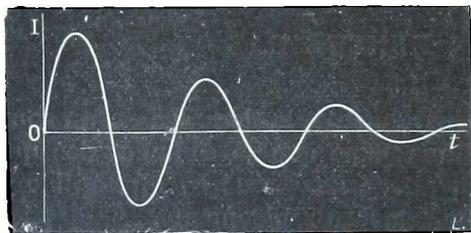


Fig. 969.

Si el tubo de comunicación es grueso y corto, la igualación de los niveles no se conseguirá sino tras una serie de oscilaciones. Si el tubo es delgado, es decir, si opone mucha resistencia al movimiento del agua, la igualación de los niveles se produce, al contrario, sin oscilaciones.

Durante las oscilaciones eléctricas, la intensidad de la corriente de descarga puede representarse por una curva (fig. 969). Se ve que dicha intensidad adquiere valores alternativamente positivos y negativos y que los máximos disminuyen de intensidad a cada oscilación.

Experimentos de Schuster y Hemsalech. — Schuster y Hemsalech han repetido experimentos análogos a los de Feddersen.

1º Iluminaban una hendidura delgada con una chispa eléctrica y proyectaban la imagen de la hendidura en una película fotográfica, fija en la periferia de una polea que giraba rápidamente. La imagen obtenida está claramente compuesta por una sucesión de imágenes de la hendidura de intensidades decrecientes.

El fenómeno tiene el máximo de claridad cuando el circuito de descarga comprende un carrete de mucha self-inducción.

De todos modos, Hemsalech demostró que, si se introduce hierro en el carrete, disminuyen mucho las oscilaciones. Lo mismo ocurre si se introduce un núcleo de cobre. En este último caso, la disminución debe atribuirse a las corrientes de Foucault. En el caso del hierro, el efecto es mixto: se debe al mismo tiempo a las corrientes de Foucault y a la imantación del hierro.

2º Hemsalech ha demostrado igualmente la naturaleza oscilante de la descarga haciendo brotar la chispa entre dos láminas colocadas en el mismo plano y cuyos bordes, situados frente a frente, formaban entre sí un pequeño ángulo. Se insufla aire perpendicularmente a la chispa y así se la separa en una serie de trazos luminosos.

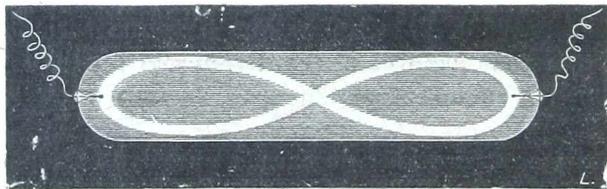


Fig. 970.

El estudio espectroscópico (626) ha hecho ver a Hemsalech que la chispa se produce primeramente en forma de un trazo luminoso, a través del aire, y

que las oscilaciones se producen luego en el vapor metálico que procede de los electrodos.

Experimentos de Paalzow. — También se puede demostrar la naturaleza oscilatoria de la descarga por los experimentos de Paalzow.

* Está dado por la fórmula $T = 2\pi\sqrt{CL}$; en que C representa la capacidad del condensador en unidades electromagnéticas, y L el coeficiente de self-inducción del circuito en el mismo sistema de unidades. La descarga será oscilante si la resistencia R del circuito es inferior a $\sqrt{\frac{4L}{C}}$; y continua, si es superior a este valor.

Produce la descarga en un tubo de Geissler algo ancho, dispuesto paralelamente a los polos de un electroimán. Si la descarga no es oscilante (lo cual se consigue simplemente colocando los dos electrodos del tubo en comunicación con los extremos del alambre inducido de un carrete de Ruhmkorff), los dos polos, que actúan en sentido contrario en las dos mitades del resplandor, le dan la forma de una S que se invierte al cambiar el sentido de la descarga. Ahora bien, con la descarga de una batería en un circuito de poca resistencia, la apariencia es la de un 8 (fig. 970), superposición de las dos apariencias precedentes, que indican que la descarga pasa alternativamente en ambos sentidos. Si en el circuito se intercala una gran resistencia, realizada por una cuerda mojada, por ejemplo, el resplandor adquiere de nuevo la forma de S, característica de una descarga que se produce en un sólo sentido.

986. Efectos de inducción de las descargas oscilantes. — Experimentos de Tesla. — Una descarga oscilante constituye una corriente que cambia de sentido gran número de veces por segundo y que varía, por tanto, rápidamente. Por consiguiente, debe esperarse encontrar en ella efectos considerables de inducción en circuitos colocados en sus inmediaciones. Estos fenómenos han sido producidos en estos últimos tiempos por Tesla y Hertz, en condiciones particularmente notables.

Experimentos de Tesla. — Aparato experimental. — El aparato de

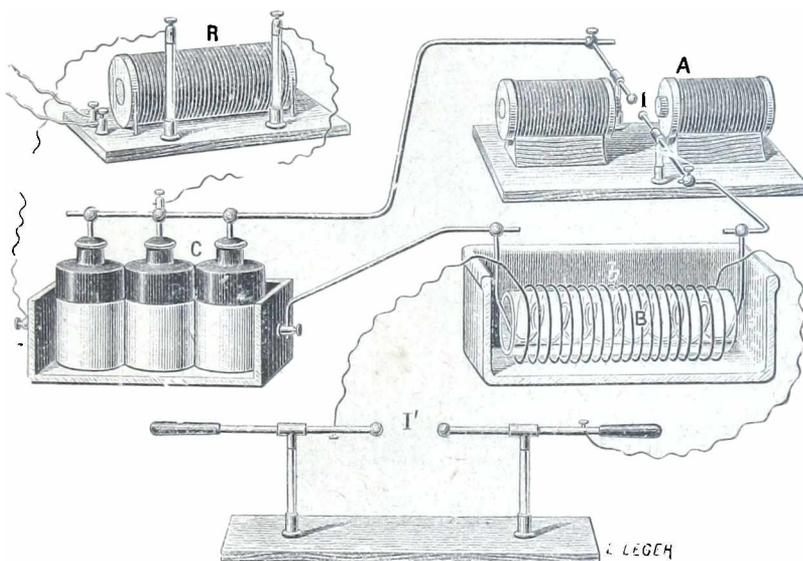


Fig. 971.

Tesla (fig. 971) se compone de un carrete de Ruhmkorff R, que carga una botella de Leyden ordinaria, o una batería C, cuya descarga oscilante se efectúa a través de algunas espiras de un alambre grueso B. Esta descarga induce entonces una corriente oscilante de corto periodo en un alambre largo y fino b, enrollado en un tubo de vidrio al rededor del alambre B. El carrete se halla sumergido en una urna rectangular, llena de un líquido aislador, por ejemplo, aceite de engrasar. Los extremos del circuito de alambre fino se hallan en I'; el circuito de descarga contiene una interrupción I, colocada entre los polos de un

electroimán poderoso, el cual tiene por objeto soplar la chispa, por la fuerza electromagnética que ejerce sobre la corriente que forma esta chispa. El conjunto constituye un verdadero transformador, cuyo carrete B es el circuito primario, y el C el secundario.

OBSERVACIÓN. — Es preferible constituir el condensador por dos botellas de Leyden asociadas en *cascada*. Las armaduras internas AA' (fig. 972) de las dos botellas están unidas a la vez al alambre secundario del carrete y a las bolas del *explosor* e. Las armaduras externas BB' están unidas por el alambre primario P del transformador Tesla. Admitamos que la corriente del carrete cargue a A positivamente y A' negativamente; B y B' se cargarán, la primera negativa y la segunda positivamente. En el momento de la descarga, las electricidades de A y A' se neutralizan mutuamente por una corriente que va de A a A'. Al mismo tiempo,

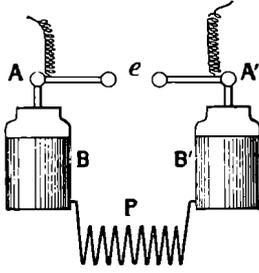


Fig. 972.

las cargas de B y B' se neutralizan por una corriente de B' a B. La ventaja de este aparato es que cada botella no soporta sino la mitad de la diferencia de potenciales total; por consiguiente, tiene menos probabilidades de ser estropeada por una descarga a través de su dieléctrico.

Efectos del aparato Tesla. — 1º Realizanse los mismos efectos que consiguió Crookes, uniendo un electrodo colocado en una ampolla vacía, sólo a uno de los polos del carrete de descarga.

2º Encerrando en la ampolla un filamento de carbón o de platino, y, más generalmente, un cuerpo cualquiera, se constituye una verdadera lámpara eléctrica *unipolar*.

3º Acercando la mano, aumentase la capacidad de la lámpara y, por tanto, su brillo.

4º A uno de los polos del carrete, se une una hoja de metal paralela al suelo, y el otro polo comunica con el suelo. En todo el espacio comprendido entre la hoja metálica y el suelo, el carrete entretiene un campo electrostático vibratorio, cuyas líneas de fuerza son sensiblemente verticales. Si se coge, en la mano, un tubo de vacío, sin electrodos (tubo Tesla) y se dispone paralelamente a las líneas de fuerza, *iluminase en toda su longitud con un resplandor pálido*. Si se coloca perpendicularmente a las líneas de fuerza, permanece oscuro.

5º Se produce un penacho voluminoso y continuo, que ofrece el aspecto de una verdadera llama, en uno de los polos, uniendo el otro polo a un cuerpo de capacidad conveniente.

987. **Experiencias de Hertz.** — En uno de los aparatos imaginados por Hertz para producir descargas oscilantes y que se llaman excitadores de Hertz (fig. 973) la capacidad está constituida por dos placas rectangulares de cobre PP' provistas de vástagos metálicos, cuyas bolas extremas b pueden acercarse a voluntad. Se le carga por medio de un carrete de Ruhmkorff. La descarga oscilante se efectúa entre las bolas b. Explorando el espacio por medio de un conductor especial, constituido por un

alambre encorvado en forma de círculo y que presenta pequeña interrupción (fig. 974), se observa que en la interrupción saltan chispas cuando la distancia de la dos bolas del aparato está convenientemente elegida. Estas se deben principalmente a las grandes fuerzas electromotrices de inducción que desarrollan las oscilaciones de la descarga en el circuito.

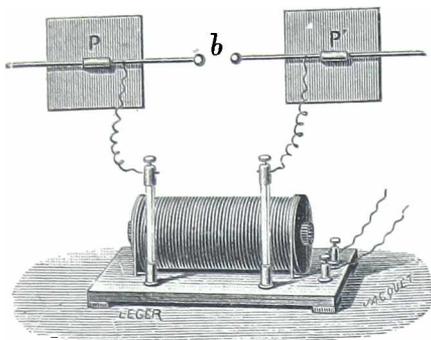


Fig. 973.

Al mismo tiempo, al efecto de inducción se sobrepone un efecto de influencia electrostática, debido a las cargas eléctricas del excitador*. El campo electrostático producido por las cargas de P y P' es perpendicular al campo magnético de la descarga.



Fig. 974.

Estos aparatos, que revelan las oscilaciones eléctricas como los resonadores de Helmholtz (450) ponen de manifiesto las ondas sonoras, se han llamado por analogía *resonadores eléctricos*. Además, estos aparatos tienen por sí mismos un periodo propio de oscilación; los efectos obtenidos serán muy notables si este periodo es igual al del excitador de Hertz, es decir si este resonador está *acorde* con el excitador.

988. **Velocidad de propagación y propiedades de las ondas electromagnéticas.** — 1º *Ondas electromagnéticas.* — Las experiencias de Hertz tienen suma importancia, porque han hecho ver claramente que los efectos del oscilador se propagan con una velocidad finita que se ha podido medir y se ha visto que es igual a la de la luz. — Por consiguiente el aparato de Hertz transmite en el espacio verdaderas ondas llamadas *electromagnéticas*.

2º *Reflexión de las ondas electromagnéticas.* — Estas ondas son capaces de *reflejarse*. Colocando el eje de un oscilador según la línea focal de un espejo metálico que tenga la forma de un cilindro parabólico, se pueden transmitir las ondas a una gran distancia sin notable debilitación.

3º *Refracción de las ondas electromagnéticas.* — Análogamente, estas ondas pueden *refractarse*. Un prisma de materia aisladora, por ejemplo de ebonita, las desvía de su dirección.

4º *Interferencias de las ondas electromagnéticas.* — *Medida de su velocidad de propagación.* — *Experimentos de Blondlot.* — Finalmente, estas ondas pueden *interferir*, — y gracias a esto se ha podido medir su

* Se la hace desaparecer colocando la interrupción del circuito inducido perpendicularmente a la línea de las bolas *b*. Recíprocamente, se hace desaparecer el efecto de inducción electromagnética colocando el plano del circuito paralelamente a las líneas de fuerza del campo magnético de la corriente de descarga. El efecto de inducción es, al contrario, máximo, cuando el plano del circuito pasa por la línea de las bolas *b*, porque entonces este plano es perpendicular a las líneas de fuerza del campo magnético de la corriente de descarga.

velocidad de propagación. Si se coloca un oscilador enfrente de una lámina conductora en comunicación con el suelo, las ondas se reflejan e interfieren con las directas, como ocurre con el sonido o la luz. Entonces resultan ondas estacionarias, especialmente planos nodales en que un resonador no produce chispas. La distancia de dos planos nodales consecutivos representa la semilongitud de onda λ de las oscilaciones. Luego estas oscilaciones se propagan con una velocidad finita V tal que se tiene $\lambda = VT$.

Cuando el resonador tiene una forma geométrica, se puede calcular T conforme a la fórmula ($T = 2\pi\sqrt{CL}$), que es lo que ha hecho M. Blondlot (989). Conociendo así T y λ por la distancia de dos planos nodales, se tiene V . Así se halla una velocidad análoga a la de la luz.

5º *Oscilaciones de corto período.* — *Experimentos de Righi Bose y Lebedew.* — Las oscilaciones obtenidas por los aparatos del género del de Hertz tienen bastantes longitudes de onda, unos 30 metros (lo cual corresponde a un período de una diezmillonésima de oscilaciones por segundo). Luego con tales aparatos no es fácil producir en una sala planos nodales, porque distan 45 metros.

Con aparatos de pequeñas dimensiones, Righi y Lebedew han podido obtener ondas que no pasaban de unos cuantos centímetros de longitud. Así es cómo Righi ha podido repetir la mayor parte de los experimentos que se hacen con la luz : ondas estacionarias, espejos de Fresnel, medida de los índices por el prisma y las interferencias, interferencias de las láminas delgadas, difracción, polarización por reflexión, reflexión total, fenómenos de las redes.

Esta notable serie de experimentos relaciona las oscilaciones eléctricas con los fenómenos luminosos. Las ondas eléctricas tienen todas las propiedades de una luz de grande longitud de onda, (unas 5000 veces la de la luz verde en los experimentos de Righi).

6º *Teoría electromagnética de la luz, de Maxwell.* — El experimento de Hertz es un testimonio notable en apoyo de la teoría anterior de Maxwell, la *teoría electromagnética de la luz*. En esta teoría, Maxwell supone que a lo largo de un rayo luminoso *polarizado*, se propagan un campo magnético oscilante, perpendicular al rayo, y, al mismo tiempo, un campo eléctrico oscilante igualmente perpendicular al rayo, pero también perpendicular al campo magnético. Las oscilaciones hertzianas realizan exactamente tal fenómeno y acabamos de ver que tienen las mismas propiedades y la misma velocidad de propagación que la luz.

Pero las ondas electromagnéticas tienen mucho mayor período que las de las radiaciones infrarrojas de mayor longitud de onda. En efecto, las oscilaciones más rápidas tienen una longitud de onda de unos 3 mm., mientras que las infrarrojas de período más grande obtenidas por Rubens y Wood (612) tienen una longitud de onda de 0,314 mm.

Si se admite la identidad de la causa de las distintas radiaciones ultravioladas, visibles, infrarrojas, electromagnéticas, se ve que pueden ordenarse estas radiaciones en una tabla como la siguiente en que, al

mismo tiempo que las longitudes de onda, se indican los nombres de las diversas radiaciones estudiadas :

Longitudes de onda.	$0\mu,1$	$0\mu,4$	$0\mu,8$	314μ$	.....	3\ 000\mu$	∞
Radiaciones.	Ultra-violetas.		Radiaciones visibles.	Infrarrojas.	Radiaciones desconocidas.	Oscilaciones eléctricas.	

No se conoce ningún fenómeno periódico cuya longitud de onda esté comprendida en el intervalo de 314π á 3 mm. Pero Hagen y Rubens han demostrado que las infrarrojas extremas tienen propiedades que las acercan más que la luz a las oscilaciones eléctricas. Especialmente para ellos, los dieléctricos, como la parafina, son del todo transparentes; el cuarzo tiene un índice de refracción igual a la raíz cuadrada de su poder inductor específico. Estos experimentos confirman también la teoría de Maxwell.

989. **Diversos experimentos sobre las ondas electromagnéticas.** — 1º *Perfeccionamientos de los aparatos de Hertz.* — *Aparatos de Lecher y Blondlot.* — El estudio de las oscilaciones eléctricas ha dado lugar a numerosísimos trabajos. En primer lugar, se ha perfeccionado el procedimiento primitivo de Hertz produciendo la propagación de las ondas a lo largo de alambres metálicos. En el sistema de Lecher, ante cada una de las placas PP (fig. 975) del excitador de Hertz, se colocan ótras dos placas P', P', a las cuales van

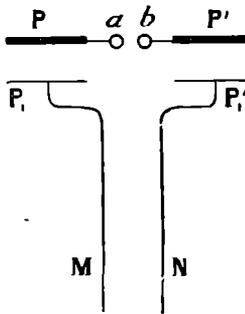


Fig. 975.

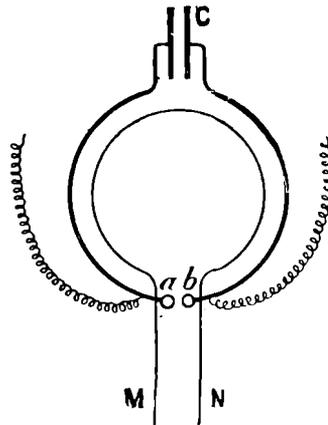


Fig. 976.

adheridos dos largos alambres paralelos. MN. En el excitador de Blondlot, hay un condensador C (fig. 976), provisto de un circuito de descarga que llega a dos bolas a b en comunicación con los dos extremos del alambre del carrete de Ruhmkorff. Además, otro alambre circular próximo al primero, termina por dos alambres paralelos largos, análogos a los del excitador Lecher.

Las ondas que se propagan a lo largo de los alambres refléjanse en los extremos de estos alambres y las ondas incidentes producen interferencia con las reflejadas. Explórase el campo oscilante que se produce entre los dos alambres, por medio de un resonador. Sarrazin y de la Rive han demostrado, por experimentos, que la velocidad de propagación de las ondas es la misma a lo largo de los alambres que en el medio dieléctrico que los rodea, tal como por ejemplo el aire.

Un aparato empleado muy a menudo consiste en reunir los alambres por un puente conductor. En este sitio, se originan, en ambos alambres, dos puntos de igual potencial. Para medir la longitud de la onda electromagnética, se deja entonces el resonador fijo y se mueve el puente. Para una posición determinada de éste no se producen chispas en el resonador. Al alejar el puente reaparecen las chispas, y luego desaparecen otra vez cuando el puente se haya movido una semilongitud de onda. De este modo, se puede, como ha hecho Drude, colocar dos puentes, uno fijo, y el otro móvil.

Con frecuencia, para estudiar el campo oscilante, se ha empleado, en vez del resonador, un tubo de gas enrarecido, sin electrodos, colocado perpendicularmente a los alambres. Se ilumina en su máximo frente a los vientres del campo electroestático y se apaga frente a los nodos.

990. **Particularidades de la descarga del excitador de Hertz.** — 1º *Resonancia múltiple.* — *Experimentos de Sarazin y de la Rive.* — La descarga del excitador de Hertz consiste en oscilaciones muy débiles. De ahí resulta el fenómeno de la *resonancia múltiple* demostrado por Sarazin y de la Rive. Estos hallaron que, para un mismo excitador, la distancia de los dos nodos depende del resonador.

Cálculos de Poincaré y Bjerknæs. — Poincaré y Bjerknæs demostraron simultáneamente que esto era debido al gran amortiguamiento de las oscilaciones del excitador y que la distancia de los dos nodos consecutivos corresponde al período propio del resonador.

2º Las oscilaciones del excitador no pueden considerarse como isócronas sino cuando la capacidad del sistema es suficientemente grande para que la energía eléctrica de la descarga sea notable. Sin esta condición, según Swingodaaw, interviene la resistencia de la chispa, y las oscilaciones no son exactamente isócronas.

Con un excitador de gran capacidad y empleando el método del espejo giratorio, Decombes ha demostrado que las oscilaciones son isócronas; pero, por el mismo método, y con un excitador de poco período, ha demostrado Tissot que la duración de las primeras oscilaciones decrece de una a otra.

3º *Oscilaciones de orden superior.* — *Experimentos de Marcelo Lamotte.* — Al igual de un sistema acústico, el excitador de Hertz proporciona, al mismo tiempo que un período fundamental, períodos de orden superior que, por otra parte, no son armónicos del período fundamental. Este fenómeno ha sido estudiado por Lamotte.

LIBRO XII

APLICACIONES DE LA ELECTRICIDAD

CAPÍTULO I

APLICACIONES DE LA ELECTRÓLISIS. — GALVANOPLASTIA. — ELECTROQUÍMICA

991. **Galvanoplastia.** — La *galvanoplastia* es el arte de moldear los metales, depositándolos por electrólisis en el interior de moldes a que no se adhieren. Fué inventado en 1837, por Jacobi y Spencer, y perfeccionado, luego, por Bocquillon y Murray.

La reproducción en cobre de un objeto es una de las principales operaciones de la galvanoplastia. Comprende dos fases.

I. *Preparación del molde.* — Si el objeto que se quiere reproducir es fácil de sacarse del molde, es decir si no presenta grandes huecos, se puede tomar la impronta, fundiendo en su superficie una aleación *Darcet*, ó *cera*, ó *estearina*, ó mejor aún gutapercha. Se ablanda en agua hirviendo la gutapercha y se la comprime sobre el objeto, sea con la mano mojada en agua fría, sea por medio de una prensa hidráulica, hasta que se enfrie completamente la masa. Como la gutapercha conserva bastante elasticidad, se la puede retirar del molde, aunque tenga huecos muy pronunciados. Para evitar la adherencia, se humedece el molde con agua de jabón antes de aplicar la gutapercha*.

Después se *metalizan* estos moldes bañándolos con plombagina, o mejor aún con una mezcla de plombagina y cobre o de plata o estaño en polvo, obtenidos por precipitación.

II. *Depósito del cobre.* — Preparado el objeto como hemos dicho, se le cuelga con un alambre de cobre, del cátodo del baño, que es una solución saturada de sulfato de cobre en agua acidulada de 10 por 100 de ácido sulfúrico. El ánodo es una lámina de cobre**. Tan pronto como pasa la corriente, el molde se recubre progresivamente de cobre. El baño está

* En el caso de una *protuberancia redonda*, se toma el molde en varias partes que luego se unen por medio de señales.

** Tomando soluciones convenientes se obtienen *galvanos* de plata, oro, níquel o hierro.

contenido en grandes artesas de madera forradas de plomo. En los talleres de Christoffe, en París, hay artesas que contienen cada una 30 metros cúbicos de líquido*.

La corriente debe ser continua y lo constante que sea posible. Esta la suministra una batería de acumuladores de gran rendimiento, cargados por dinamos. Para obtener buenos resultados no se debe pasar de un régimen de 3 amperios por decímetro cuadrado con 0,8 en los bornes de la artesa. En estas condiciones se tendrá al cabo de veinticuatro horas una capa de 1 milímetro de espesor. Cuando el depósito llega a tener el espesor deseado, se lava el objeto y se le retira de su molde ablandando la gutapercha con agua caliente,

En caso de que los objetos presenten redondeces (busto o estatua) se usa como ánodo una armazón de plomo que toma groseramente la forma del objeto. Como este ánodo es insoluble, se necesita una fuerza electro-motriz de 2 voltios para vencer la polarización; el baño se descompone formando oxígeno y ácido sulfúrico. Se mantiene su riqueza constante colocando en el baño sulfato de cobre en cristales.

992. **Electrotipia.** — Cubriendo de cobre el molde de un grabado en madera, en cobre, o un fotograbado, resulta un clisé galvánico de este grabado. Ese clisé es sumamente fino (próximamente 0,05 mm. de grueso), y no podría resistir a la presión de las prensas tipográficas si no se le reforzara vaciando por detrás una capa de aleación de letra de imprenta, que permite obtener numerosas reproducciones del grabado.

Para darle más dureza se le cubre con un depósito pelicular de hierro en un baño que se ha formado disolviendo, bajo la influencia de la corriente eléctrica, una lámina de hierro en una solución de carbonato de amoníaco. También se usa el platino y el níquel. Preparados de este modo, los clisés galvánicos pueden soportar enormes tiradas sin deformación. Por lo demás, el clisé primitivo (madera o cobre) permanece intacto y puede suministrar tantos clisés galvánicos como se quiera.

993. **Plateado.** — Elkington hizo en 1840 los primeros depósitos de plata por descomposición del *cianuro doble de plata y de potasio*. Desde entonces han sido considerables los progresos de esta industria. Desde 1900, se podría evaluar en 200 000 kilogramos la cantidad de plata empleada anualmente para el plateado electroquímico**.

Preparación. — Los objetos que se desea platear deben estar perfectamente limpios. Si son de latón o de maillechort se les limpia con potasa hirviendo y después se les desoxida metiéndolos unos instantes en un baño de ácido nítrico. Se termina pasándoles rápidamente por una mezcla de ácido sulfúrico, ácido nítrico, sal marina y hollín y luego se les enjuaga en agua corriente. Los objetos de estaño, de hierro, etc., serían deteriorados por este baño; por eso se les limpia frotándoles con polvos de piedra pómez. Después de la desoxidación, se meten un instante los objetos en nitrato de mercurio diluido, y se llevan al cátodo del baño.

* En estas artesas se han obtenido los grupos que decoran el frontón de la Opera, la Virgen de Nuestra Señora de la Guardia, en Marsella, etc.

** En esta cifra, Francia figura por 20 000 kil.; los Estados Unidos por 80 000 : la casa Christoffe de París emplea anualmente por término medio 6 000 kil. en orfebrería y plateado. (Los datos técnicos de este capítulo han sido dados por M. Bazinet, ingeniero de la casa Cristoffe.)

Depósito de plata. — El baño se compone de una solución de cianuro de plata y de potasio en agua, que contiene 25 gramos de plata por litro. Los ánodos son láminas de plata pura, cuya superficie debe ser por lo menos igual a la de los objetos que se van a platear. El potencial en los bornes de la artesa debe ser 0v,8 y el régimen 0amp,25 por decímetro cuadrado. Para tener una capa de plata durable, es necesario depositar 3 gramos por decímetro cuadrado.

Al salir del baño, la plata es *mate*, sin aspecto metálico. Se le devuelve este brillo con rascadores circulares de latón que dan vueltas rápidamente.

Se la *bruñe* frotándola con herramientas de acero que le dan el pulimento de un espejo.

994. **Dorado.** — El dorado necesita las mismas preparaciones que el plateado. El baño se compone de una solución de cianuro de oro en cianuro de potasio con 10 gramos de oro por litro. El ánodo es una lámina de oro *fino*.

Si al baño se añade cianuro de cobre, se obtiene *oro rojo*. En este caso hay que servirse de un ánodo de *oro rojo*.

Del mismo modo se obtiene *oro verde* añadiendo al baño cianuro de plata, sirviéndose como ánodo de una lámina de oro verde.

Para dorar joyería menuda se emplea el baño siguiente :

Fosfato de sosa cristalizada	600 gramos.
Bisulfato de sosa	100 —
Cianuro de potasio	10 —
Oro transformado en cloruro	10 —
Agua destilada	10 litros.

Este baño se emplea con un ánodo de platino, que acaba por agotarse, y cuando el oro se deposita, ya no tiene el hermoso color amarillo, sirviendo así para el dorado rojo. Después se le reemplaza por un baño nuevo.

995. **Niquelado.** — El niquelado ha tomado grandísima importancia desde que el empleo de las máquinas dinamoeléctricas ha disminuido un 80 por 100 el precio de la energía en los talleres de electroquímica. Las piezas que se van a niquelar son generalmente pulimentadas. Se las desengrasa frotándolas con un cepillo suave empapado en lechada de cal y se cuelgan del cátodo de un baño compuesto de una solución de sulfato doble de níquel y amoníaco, concentrada a 8° Baumé. Los ánodos son de níquel. A las 2 horas se retiran del baño las piezas y, después de enjuagadas y secas, se les da brillo pulimentándolas con un disco cubierto de madapolán, empapado de sebo y cal de Viena, que da 2 000 vueltas por minuto.

996. **Baño de cobre.** — Para bañar de cobre objetos fundidos o de hierro se emplean baños de cianuro doble de cobre y potasio, o soluciones neutras o alcalinas de oxalato o de tartrato de cobre.

Añadido a estos baños una sal de cinc se obtiene un depósito de latón que a veces se prefiere al cobre rojo.

997. **Electrometalurgia.** — *Refinadura del cobre.* — El cobre impuro se funde en láminas y se las pone como ánodos en artesas que contengan sulfato de cobre. El cobre puro se deposita en láminas finas, mientras que los demás metales quedan en solución en el líquido, o caen al fondo de la artesa en forma de cieno, en el cual se hallan el oro y plata contenidos en el cobre.

En lugar de depositar el cobre en láminas, se le puede también depositar en cilindros de acero, que giran en el baño. Comprimiéndolo en seguida con rodillos de ágata se obtienen tubos de cobre sin soldadura que se pueden estirar mucho.

Análogamente se ha aplicado la electrólisis a la *refinadura del níquel*, a la *extracción de la plata del plomo argentífero*, a la *extracción del oro por cianuración* de los minerales de oro y la descomposición electroquímica del cianuro de oro así formado.

La electrólisis del *fluoruro de aluminio fundido* ha facilitado la fabricación de este metal en grande escala, bajando su precio de 200 francos a 2 francos el kilo.

998. **Fabricación electrolítica de la sosa, del cloro, de los hipocloritos y de los cloratos alcalinos.** — Hace ya algunos años que la electrólisis de los cloruros alcalinos ha permitido fabricar directamente el cloro y la sosa cáustica.

Generalmente se usan ánodos de carbón o de platino y un cátodo de mercurio. El sodio es absorbido por el mercurio, y cuando éste contiene gran cantidad se le pasa por una artesa que contenga agua. Entonces se produce una lejía de sosa que se concentra cada vez más y basta evaporarla. El cloro desprendido del ánodo se usa para fabricar hipocloritos.

También se pueden obtener hipocloritos descolorantes por la simple electrólisis de agua salada entre dos electrodos de platino; entonces el cloro y la sosa forman hipoclorito de sosa, que sirve para blanquear la pasta de papel. Estas soluciones se usan también para desinfectar las aguas de cloacas.

Electrolizando cloruro de potasio se obtiene el clorato de potasa.

CAPÍTULO II

APLICACIONES DEL TRANSPORTE DE LA ENERGÍA POR LA CORRIENTE ELÉCTRICA. — ALUMBRADO Y CALEFACCIÓN ELÉCTRICOS. — APLICACIONES DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS

ALUMBRADO Y CALEFACCIÓN ELÉCTRICOS

999. **Lámparas de incandescencia de filamento de carbón.** — El calor que desprende una corriente eléctrica en un alambre de sustancia muy difícilmente fusible puede imprimir a este alambre una temperatura lo bastante elevada para que se convierta en intenso foco de luz. Este es el fundamento de las lámparas eléctricas llamadas *de incandescencia*.

El conductor empleado es generalmente un filamento delgado de carbón F (fig. 977), encerrado en una ampolla vacía, y sustraído así a la combustión y también al enfriamiento que produciría un gas contenido en la ampolla.

Los dos extremos del filamento van a parar a pequeñas pinzas metálicas que conducen la corriente eléctrica al carbón; el conjunto está soldado por medio de un depósito carbonoso seco y carbonizado después.

Estos conductores atraviesan la base de la ampolla y van a terminar en topes metálicos aislados. La lámpara se fija por un sistema de bayoneta B, en un tubo en cuyo interior se hallan los alambres que conducen la corriente. Estos alambres van a unirse a dos vástagos metálicos C que apoyan por la fuerza de dos resortes sobre los topes de al

lámpara. El todo puede fijarse a un soporte cualquiera, cornucopia, araña, etc. Para encender o apagar la lámpara, basta dar vuelta a un interruptor colocado en un punto cualquiera del circuito.

Se fabrican lámparas de incandescencia de intensidades muy diferentes, que varían entre 1 y 200 bujías. Las que se usan generalmente tienen una intensidad de 16 bujías. Funcionan bajo una tensión de unos 100 voltios y su resistencia en caliente es de 20 ohmios. Por lo tanto, exigen una corriente de $100 : 200 = 0,5$ amperios y consumen $0,5 \times 110 = 55$ vatios o sea $55 : 16 = 3,4$ vatios por bujía.

Fabricación de las lámparas de filamento de carbono. —
1° *Preparación del filamento* — Se emplea una pasta de celulosa disuelta en cloruro de cinc que se hace pasar por presión a través de una hilera de diámetro adecuado; se cortan los filamentos de la longitud que se quiera, y después se calcinan en vaso cerrado a temperaturas de 600 a 1500° para carbonizarlos.

2° *Refuerzo.* — Los filamentos preparados de este modo son frágiles e irregulares, por eso se los somete a la operación del refuerzo, que consiste en someterlos a una corriente, colocados previamente en un carburo de hidrógeno líquido (aceite mineral) o gaseoso (vapor de gasolina o de bencina). La corriente enrojece el filamento; el carburo se descompone, y se deposita carbono en el filamento, sobre todo en los puntos de endeble diámetro, porque estos puntos, de resistencia más grande, se habían calentado más.

3° *Montaje.* — Las puntas del filamento se enlazan a los extremos, enrollados en hélices, de dos alambres de níquel. Esta ensambladura se calienta eléctricamente en petróleo, el cual se descompone, resultando la formación de una especie de cemento que adhiere el filamento a su soporte.

En el sitio donde los alambres metálicos deben atravesar el vidrio de la ampolla se les sueldan dos alambres de platino. Este metal, en efecto, es el único que se pueda soldar al vidrio sin que se rompa, porque tiene el mismo coeficiente de dilatación.

Como éste es muy costoso, trátase de reemplazarlo por otros metales, especialmente por acero de níquel (*platinita*) a 1,10 por 100 de carbono y 46 por 100 de níquel, indicado por M. Guillaume, y cuyo coeficiente de dilatación es sensiblemente igual al del vidrio.

4° *Operación del vacío.* — Armados ya los filamentos en las ampollas se sueldan varias de estas al mismo tubo en comunicación con una trompa de mercurio, que hace un vacío tan perfecto como es posible.

1000. **Lámparas de filamento metálico.** — Hace ya algunos años que se ha generalizado el empleo de lámparas cuyo filamento es de un metal que resiste sin fundirse altas temperaturas, en lugar de las lámparas de carbono. Después de diversos ensayos, se ha escogido sólo dos metales: el *tántalo* y el *tungsteno*. El rendimiento de estas lámparas es mucho mayor que el de las lámparas de carbono, a causa de la alta temperatura de fusión de los metales empleados (2 800° para el *tántalo*, 2 900° para el *tungsteno*). Una lámpara de *tántalo* con-

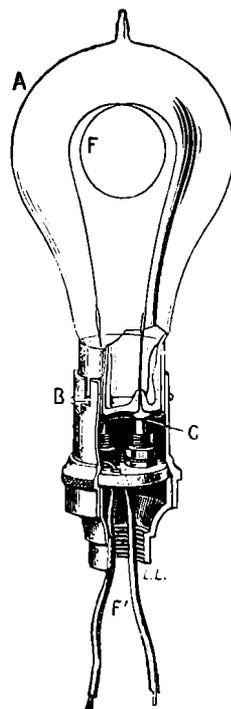


Fig. 977.

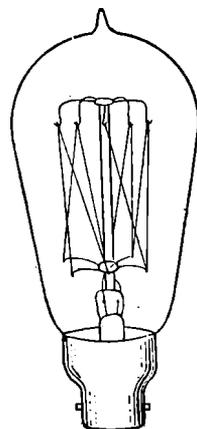


Fig. 978.

sume unos 2 vatios por bujía, y la de tungsteno de 1 vatio a 1,3 vatio.

Como el filamento metálico es mucho más conductor que el de carbón, debe ser muy fino y largo, cuando la lámpara deba funcionar a los voltajes ordinarios de 100 a 120 voltios. Se ha tropezado con grandes dificultades en la fabricación de los filamentos de tungsteno, por no ser maleable este metal; pero últimamente se ha conseguido estirarlo, lo cual ha simplificado mucho la construcción de las lámparas. El filamento está dispuesto en zizás en la ampolla y sujeto por corchetes elásticos mantenidos por un pie de vidrio (fig. 978); esta disposición permite la libre dilatación del filamento. Estas lámparas cuestan más que las de carbón, por las dificultades de fabricación; además el filamento es más frágil.

Hay ventaja en emplear las lámparas de filamento metálico con bajos voltajes; pues así el filamento puede ser más corto y grueso, y por tanto menos frágil.

1001. Lámpara Nernst. — La lámpara Nernst (fig. 979, 980) posee un filamento constituido por óxidos de cerio, torio y otras tierras raras, análogas a las que componen las camisetas Auer. Sólo es conductor cuando se halla calentado al rojo.

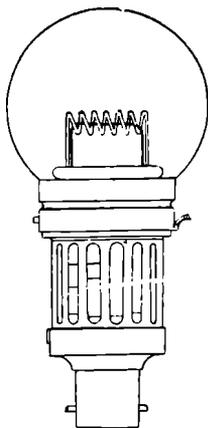


Fig. 979.

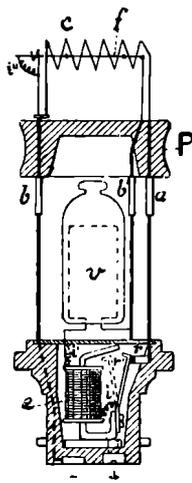


Fig. 980.

Para producir el alumbrado, hace falta calentar primero el filamento. Esta operación se efectúa automáticamente por un aparato de calefacción eléctrica destinado a calentar al rojo el filamento. Está constituido por una espiral de porcelana cuyas espiras están rodeadas de un alambre de platino muy delgado. La corriente sigue la lámina-contacto de un electroimán *e*, atraviesa la varilla *a*, circula por la espiral y vuelve por la varilla *b* al segundo contacto, que lleva el signo (—). La espiral se vuelve color rojo oscuro en cuanto se lanza la corriente y calienta el filamento *f*, el cual, al cabo de 20 o 30 segundos está suficientemente caliente (a unos 600°) y se vuelve conductor; y como está ramificado en derivación sobre el circuito precedente, se deja atravesar por una parte de la corriente que vuelve por *i*, *e*, *v*, *b*, *f*, de donde vuelve a la varilla *b* y al borne (—), por medio del alambre *v*. Pero, en

cuanto la corriente derivada es suficientemente intensa, el interruptor *r* funciona y atrae su contacto *v*; se corta la comunicación con la espiral de calefacción, que cesa de funcionar. De este modo, toda la corriente pasa al filamento que se vuelve incandescente y la lámpara funciona con regularidad.

En *v* se ve una resistencia auxiliar destinada a preservar al filamento luminoso contra las variaciones de tensión. Está constituida por un alambre de hierro muy delgado, encerrado en una ampolla llena de hidrógeno, lo cual lo preserva de la oxidación. Se ha escogido el hierro, porque su resistencia aumenta mucho a medida que se eleva la temperatura; por lo tanto, es el más apto para compensar la variación inversa del filamento.

Como el filamento no es combustible, no necesita ser colocado en el vacío. Pero se le protege con una bombilla sin brillo, para difundir la luz.

1002. Arco voltaico. — Si se acercan hasta ponerse en contacto los extremos de dos lápices de carbón conductor en relación con los polos de

un generador de corriente eléctrica (fig. 981), la corriente pasa y vuelve en seguida incandescentes los carbones. Si entonces se los separa, prodúcese, del uno al otro, una llama luminosa a la cual Davy, que descubrió el fenómeno, dió el nombre de *arco voltaico*. Al mismo tiempo, los extremos de los carbones adquieren un brillo deslumbrador. La longitud que puede alcanzar el arco, depende de la fuerza electromotriz del generador.

Los dos carbones se usan ardiendo, pero el positivo *se gasta dos veces antes* que el negativo y se agrieta en forma de cráter. Este cráter del carbón positivo es la parte más luminosa del conjunto. Su temperatura, que es independiente de la potencia del arco, la ha fijado Violle en 3500° aproximadamente.

Hemos supuesto que una corriente *continua* mantiene el arco; pero también puede emplearse una corriente *alterna*, y en este caso los carbones se gastan simétricamente.

Son varias las teorías propuestas para explicar el fenómeno del arco eléctrico. La última de M. Guye se funda en el hecho de que los cuerpos incandescentes emiten electrones con gran velocidad; por sus choques con las moléculas de gas o de vapor inmediatas, rompen estas moléculas formando iones, que se mueven en sentidos contrarios, chocando violentamente con el cátodo los iones positivos, y con el ánodo los negativos. Este bombardeo es el que elevaría la temperatura de los electrodos y mantendría la incandescencia del cátodo, necesaria para la emisión de nuevos electrones y la continuación de la serie.

El arco alterno se apaga y enciende a cada alternancia. Jamin y Roger lo demostraron primero proyectando la imagen del arco por un espejo giratorio. También se puede emplear, para estudiar las particularidades del arco alterno, un método estroboscópico, como lo hizo Joubert.

Jamin y Maneuvrier han demostrado que si los carbones son desiguales (3 mm. y 2 mm. de diámetro por ejemplo), la corriente pasa más fácilmente del más grueso al que lo es menos (que está más caliente). De donde resulta que, si se intercala un amperímetro de corriente continua en el circuito, se desvía indicando la diferencia de intensidad de las dos alternancias. Luego un arco alterno de carbones desiguales puede servir de *válvula*, dejando pasar una intensidad dominante en un sentido. La diferencia de las intensidades de las dos alternancias es tanto más grande cuanto mayor es la diferencia de temperatura entre los dos carbones; el mejor resultado se obtiene con un arco producido entre una punta fina y una gran masa de carbón, que se calienta poco.

1003. **Lámparas de arco.** — El fenómeno del arco eléctrico se utiliza generalmente en lámparas que tienen gran poder luminoso.

Carbones empleados en el arco voltaico. — Los carbones están formados de carbón de retorta o de coke de petróleo, o de negro de humo, aglome-



Fig. 981.

rados con alquitrán que se comprime a 230 kg. por cm^2 , pasándolos luego por la hilera y cociéndolos durante quince días a 1600° . El carbón positivo colocado generalmente en la parte superior del arco, recibe a veces, siguiendo su eje, una *mecha* más blanda compuesta de un carbón de composición diferente y que contiene diversas sales (silicato de potasa, fluoruros de calcio y de bario) cuyos vapores aumentan la conductibilidad del arco. De este modo se obtienen arcos fijos con menor tensión y el desgaste de los carbones es más regular.

Carbones impregnados o carbominerales. — También se fabrican, actualmente, carbones que contienen diversas sales volátiles (fluoruro de calcio, borato de bario) que aumentan el poder luminoso de la llama del arco.

Tales son los carbones Bremer y los carbones Blondel. Desgraciadamente, producen humos corrosivos que son causa de que los carbones de llama sólo puedan emplearse al aire libre.

Potencia absorbida por un arco eléctrico. — Gracias a su alta temperatura, el arco eléctrico constituye un modo de alumbrado cuyo rendimiento es mucho mejor que la incandescencia. Una lámpara de arco de corriente continua, de carbón ordinario, consume poco más o menos 0,514 vatio por bujía; con carbones carbo-minerales Blondel, apenas consume 0,409 vatio por bujía. El arco alterno rinde menos. A pesar de consumir poco, la lámpara de arco no se puede emplear para el alumbrado doméstico, porque con el arco sólo pueden obtenerse lámparas de gran intensidad.

1004. **Reguladores.** — En las lámparas de arco hay que prevenir la extinción que se produciría, a causa del uso y de la separación de los

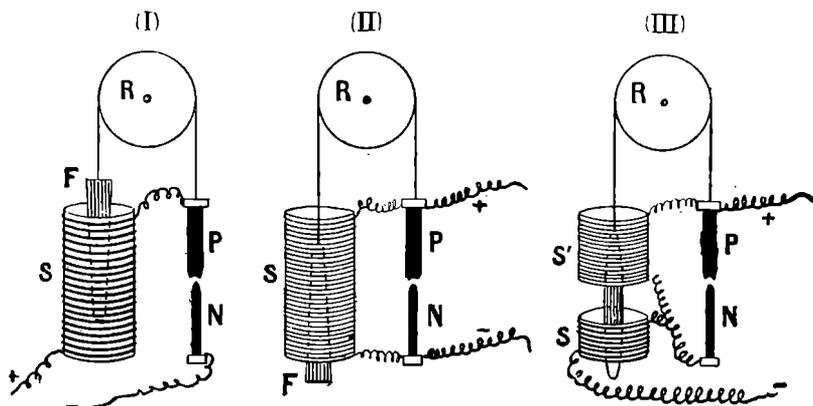


Fig. 982.

carbones. Esto se consigue por medio de los *reguladores* que acercan los carbones cuando su distancia se hace excesiva. El primer aparato de estos fué inventado por Foucault. Actualmente, se emplean numerosos sistemas.

Principio de los reguladores. — Tres son las clases de reguladores que se han ideado: los llamados *en serie*; los de *derivación* y los *diferenciales*.

1º *Reguladores en serie o de intensidad constante.* — El principio de este sistema es

el siguiente : El carbón positivo P (fig. 982, I) está pendiente de un alambre que pasa por una polea R y tiene en el otro extremo un núcleo de hierro dulce F, que penetra, en parte, en un carrete S (de alambre grueso), en serie en el circuito; siendo el peso del carbón P y de su soporte más grande que el de F, los carbonos están en contacto. Cuando se lanza la corriente, el solenoide S atrae al núcleo y los carbonos se separan; la intensidad de la corriente disminuye a consecuencia de la resistencia del arco, y se establece una posición de equilibrio, para la cual la diferencia del peso P y de F es igual a la atracción del solenoide.

Cuando, por causa del desgaste de los carbonos aumenta la longitud y, por consiguiente, la resistencia del arco, la intensidad disminuye; el núcleo, menos atraído, sube y P se acerca a N; por tanto, la distancia de los carbonos se mantiene fija, así

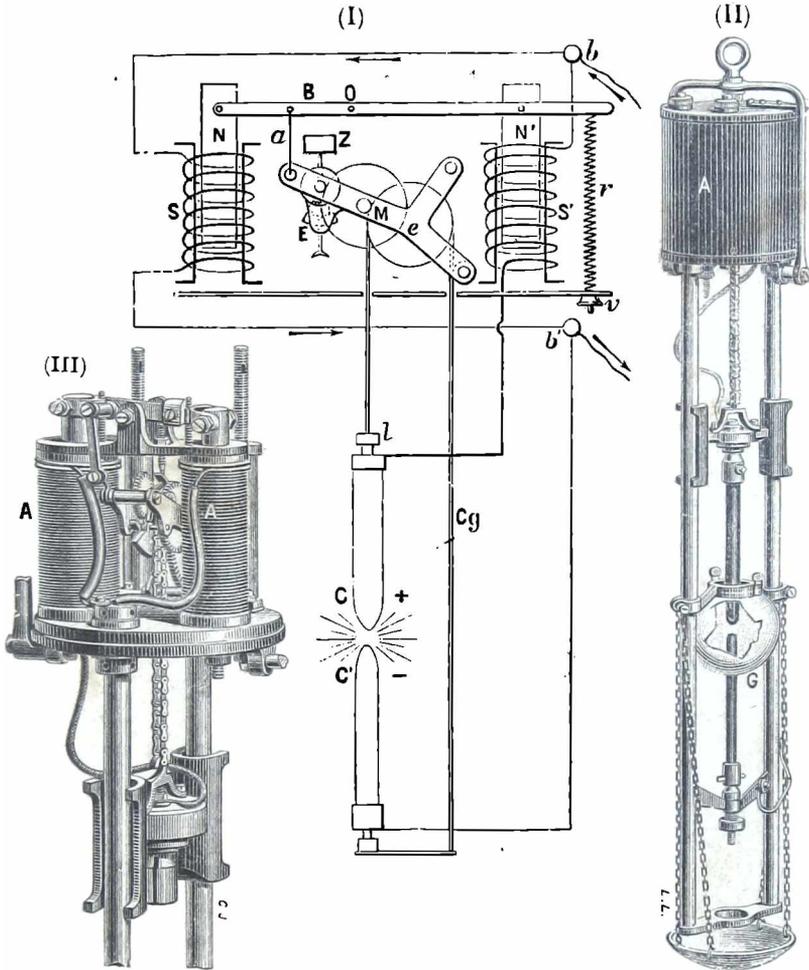


Fig. 983.

como la intensidad de la corriente. Por esta razón los reguladores en serie se denominan de *intensidad constante*.

2º *Reguladores de derivación o de diferencia de potenciales constante*. — El solenoide S (de alambre fino) está en derivación sobre los carbonos (fig. 982, II); el núcleo F es más pesado que el carbón P, por consiguiente los carbonos están separados. Cuando se lanza la corriente, pasa por S; entonces el núcleo es atraído y los carbonos se ponen en contacto. Pero como en ese momento la mayor parte de la corriente pasa por PN, el núcleo, menos atraído, baja y los carbonos se separan. Así se establece un equilibrio para una distancia proporcionada entre los carbonos. Cuando aumenta la resistencia del arco a consecuencia del desgaste de los carbonos, pasa por S mayor parte de la corriente, el núcleo es atraído y los carbonos se acercan. Como la intensidad en S depende

de la diferencia de potenciales entre P y N, los reguladores de derivación se denominan también de *diferencia de potenciales constante*.

3º *Reguladores diferenciales*. — Estos participan del sistema de los dos precedentes, toda vez que el núcleo penetra en dos carretes, uno S en serie con el arco, y el otro S' en derivación. Cuando el arco se alarga, la intensidad en S se hace más débil, y es más grande en S', el núcleo se levanta y los carbones se acercan. Los solenoides están calculados de tal manera que sus acciones se equilibran cuando el arco está en su régimen normal. Este sistema da muy buenos resultados, porque los carbones, solicitados por dos acciones inversas de sentidos contrarios, no toman jamás movimientos bruscos; de donde resulta que la fijeza de la luz es perfecta.

Lámpara de arco Japy-Helmer (de punto luminoso fijo). — Esta lámpara es el tipo del regulador diferencial.

Descripción. — Un solenoide S de alambre fino (fig. 983, I) colocado en derivación en los bornes de la lámpara, aspira el núcleo de hierro dulce N; un segundo solenoide S' de alambre grueso atravesado por la corriente principal, aspira el núcleo de hierro dulce N'; las acciones ejercidas por los dos solenoides S y S' sobre los núcleos N y N' se transmiten a un balancín B, en cuyas extremidades se encuentran suspendidos estos núcleos; este balancín B constituye un verdadero fiel de balanza.

El aparato está arreglado de tal manera que para el régimen normal, el balancín B esté en una posición de equilibrio casi horizontal. Los portacarbones, guiados por los vastagos verticales (fig. 983, II), están enlazados mecánicamente por medio de una cadena de Galle, que se arrolla sobre una rueda motriz dentada, regida por el mecanismo de relojería M.

El balancín B gobierna el escape de áncora del mecanismo M por medio de la pequeña biela de pareamiento *a*. Un muelle *v* mantiene inmóvil el escape cuando la lámpara no funciona; este muelle sirve al mismo tiempo para arreglar la lámpara: con tal fin se puede hacer variar su tensión mediante el tornillo *v* y su tuerca.

Funcionamiento. — Cuando se lanza la corriente, los carbones están separados; aquélla pasa por el solenoide de alambre fino S, el núcleo N es atraído hacia dentro del solenoide; el balancín B oscila alrededor del punto O, baja al mismo tiempo el mecanismo de relojería M, y como el escape se suelta, permite que los carbones se acerquen.

Apenas establecido el contacto, la corriente principal circula por el solenoide S' de alambre grueso; el núcleo N' es atraído y el balancín B oscila en sentido inverso: por este movimiento el escape queda calzado y el mecanismo de relojería se levanta, lo cual produce la separación de los carbones.

La figura II representa el regulador Japy-Helmer en perspectiva, la figura III representa el detalle del mecanismo.

Lámparas de arco en vaso cerrado. — Desde hace algunos años, se usa mucho lámparas de arco en que los carbones están situados en un vaso cerrado. El oxígeno del aire contenido primitivamente en este vaso se consume muy rápidamente por la combustión del carbón. A partir de este momento, los carbones ya no arden y su duración aumenta mucho. El origen de esta aplicación del arco eléctrico podría hallarse en antiguos experimentos de Jamin y Maneuvrier.

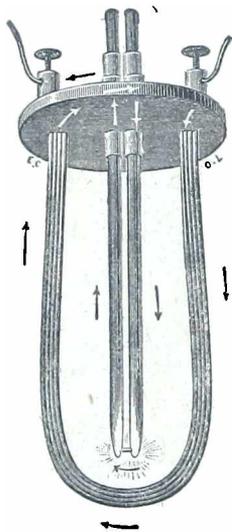


Fig. 984.

1005. **Lámparas de arco sin regulador: Bujía Jablochkoff. — Mechero Jamin.** — El mecanismo de un regulador siempre es muy delicado. Para suprimirlo, Jablochkoff imaginó una solución, que consiste en colocar los dos carbones paralelamente, interponiendo una mezcla de yeso y kaolín. Las puntas de los carbones estaban reunidas por un cebo de carbón que ardía tan pronto como pasaba la corriente. Para que los carbones se gastaran por igual, se empleaba la corriente alterna.

Jamin perfeccionó el sistema de Jablochkoff suprimiendo la substancia interpuesta entre los carbones y haciendo circular varias veces la corriente al rededor de los carbones (fig. 984) en un sen-

tido tal que el campo de la corriente, al obrar sobre el arco, ejerce sobre el mismo una fuerza que le mantiene en el extremo de los carbones.

1006. **Instalación de una lámpara de arco.** — Con toda lámpara de arco debe ponerse en serie un reóstato que da mayor estabilidad al arco. La figura 985 representa la instalación completa de una lámpara de arco sobre dos cables PP', QQ' que presentan entre sí una diferencia de potenciales de 110 voltios, por ejemplo, con el interruptor I y el reóstato R.

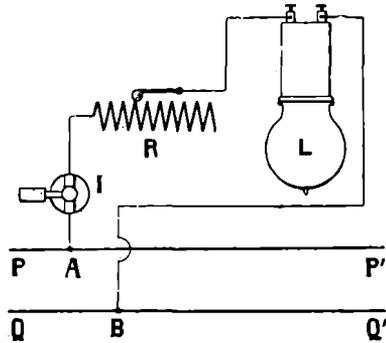


Fig. 985.

Cuando el arco funciona, la diferencia de potenciales entre los carbones es menor que 110 voltios, a causa del descenso de potencial que se produce en el reóstato. Pero, si el arco llegara a apagarse, esta diferencia de potenciales sería igual a 110 voltios. Se concibe que como el efecto del reóstato es el aumentar la diferencia de potenciales entre los carbones cuando la lámpara tiende a apagarse, su presencia aumenta la estabilidad del arco.

1007. **Lámparas eléctricas de luminescencia.** — **Lámpara de vapor de mercurio de Cooper-Hewitt.** — Estas lámparas utilizan los fenómenos luminosos producidos por una corriente eléctrica que atraviesa un gas enrarecido. Una lámpara Cooper-Hewitt está formada por un tubo largo ligeramente inclinado, en el interior del cual se practica el vacío (fig. 986). En su extremo inferior, contiene mercurio, en relación con el exterior por un alambre de platino que se pone en comunicación con el polo negativo del generador de corriente. El ánodo, que también es de platino, se halla en el otro extremo del tubo. Se enciende la lámpara, inclinándola, de modo que algunas gotas de mercurio se pongan en contacto con el ánodo y establezcan la comunicación. Cuando se endereza el tubo, la corriente persiste a través del vapor de mercurio enrarecido.

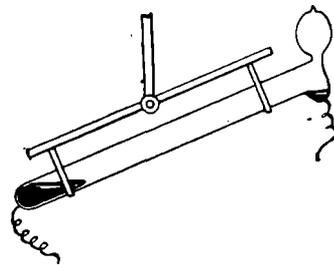


Fig. 986.

Estas lámparas son muy económicas; apenas consumen 0,45 vatios por bujía, o sea, 3 o 4 veces menos que una lámpara de arco. Desgraciadamente, la luz verdosa que aquélla emite no contiene rayos rojos; por lo cual da a los objetos que rodea un aspecto singular.

Este inconveniente se remedia combinando la lámpara de mercurio con lámparas de incandescencia que funcionen a temperatura poco elevada, y por tanto que emita muchos rayos rojos.

Lámparas de arco de laboratorio. — El espectro de la luz de la lámpara de mercurio contiene diversas radiaciones monocromáticas (principalmente, en el espectro visible, dos rayas amarillas, una verde

y otra violada), que se utilizan generalmente en las investigaciones de laboratorio. Para este fin se han creado diversos tipos de lámpara, que difieren poco de las lámparas de alumbrado.

La lámpara de mercurio emite radiaciones ultravioletadas intensas, que son absorbidas si la ampolla es de vidrio; para utilizarlas se usa una ampolla de cuarzo.

Uso de la lámpara de mercurio como válvula para corriente alterna. — Lo mismo que el arco alterno de carbones, el arco de mercurio de la lámpara de Cooper-Hewitt deja pasar más fácilmente la corriente alterna en un sentido que en otro. Por eso esta lámpara se emplea con ventaja como enderezador de corriente alterna, o mejor dicho, como *válvula*; en este caso el ánodo es de hierro o de carbón. Este efecto de válvula, debido al mercurio, ya había sido descubierto por Jamin y Maneuvrier desde 1882.

Lámparas de gas enrarecido. — Hoy se emplea para el alumbrado la luz de tubos análogos a los de Geissler, conteniendo diversos gases enrarecidos.

La más conocida de estas lámparas es la de Moore. Consiste en un tubo largo (hasta 60 metros) de 4 cm. de diámetro, que contiene aire o nitrógeno, o también gas carbónico a débil presión. El tubo puede tener varias formas, según sean los contornos que deba alumbrar. Los extremos del tubo están atravesados por alambres que van a los electrodos de carbón que hay en el tubo, y comunican con el secundario de un transformador que eleva la tensión. A consecuencia de la oclusión del gas en las paredes, el tubo se volvería progresivamente *duro*; pero una ingeniosa válvula automática permite de tiempo en tiempo la entrada de una pequeña cantidad de gas.

Con el aire, la luz es color rosa; con el nitrógeno es amarilla de oro y con el gas carbónico es muy blanca. Por desgracia, este último gas da un rendimiento más débil que el nitrógeno.

M. Claude ha reemplazado este gas por el *neón*, que él obtiene como residuo de la licuefacción del aire. El neón da un buen rendimiento, pudiendo reducirse el consumo a un vatio por bujía; la luz es anaranjada.

1008. **Calefacción eléctrica.** — La calefacción por la electricidad se va extendiendo cada vez más, tanto en las diversas aplicaciones domésticas como en las operaciones industriales.

I. *Calefacción doméstica.* — Todavía se usa poco este género de calefacción, porque, generalmente, cuesta caro la energía eléctrica. Pero en cambio tiene la ventaja de ser perfectamente higiénica, puesto que no desprende ningún gas.

1º *Radiadores.* — Para la calefacción de habitaciones se usan *radiadores eléctricos*. Unos son *luminosos*: son gruesas ampollas de filamento de carbón, que contiene un carburo de hidrógeno gaseoso. Para determinar el paso del calor hacia el exterior por convección, se ha reducido poco la presión.

Los radiadores *oscuros* comprenden sencillamente resistencias metálicas que la corriente atraviesa.

2º *Diversos aparatos.* — *Cocina eléctrica.* — También se emplea la corriente para calentar utensilios de cocina; cafeteras, teteras, planchas, etc. Los elementos calentadores son de dos clases. Los elementos planos comprenden un alambre metálico fino enrollado en espiral, comprimido fuertemente entre dos láminas aisladoras de mica o de amianto. En los elementos cilíndricos (en las teteras eléctricas por ejemplo) el alambre está enrollado en hélice en un tubo metálico aislado con mica, y cubierto luego con una envoltura cilíndrica también aisladora.

II. *Calefacción industrial.* — Muy a menudo, se emplean en la industria y en los laboratorios, aparatos de calefacción que se designan con el nombre genérico de *hornos eléctricos*.

1º *Hornos de resistencias.* — El aparato de calefacción se compone de un conductor más o menos resistente, recorrido por una corriente.

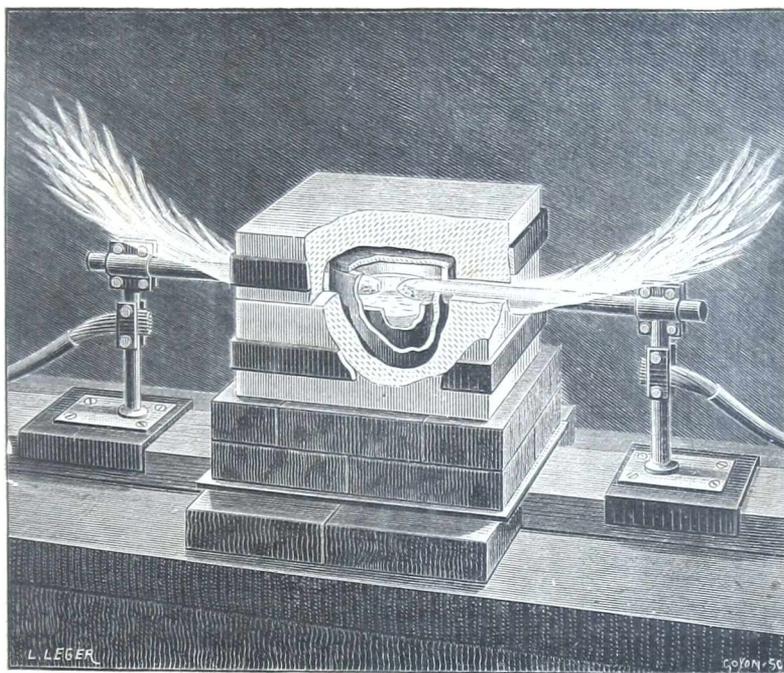


Fig. 937.

Cuando no se quiere exceder de una temperatura de 500º o 600º convienen las resistencias metálicas. Para temperaturas más elevadas se emplea, como conductor, el carbón, resguardado del contacto del aire.

Estos hornos permiten obtener una calefacción completamente regular.

2º *Hornos de arco.* — Para obtener las temperaturas más elevadas, se recurre al arco eléctrico. Ante todo, deben citarse las magníficas investigaciones de Moissan acerca de las reacciones químicas a temperaturas muy elevadas. El horno de Moissan (fig. 987) se compone esencialmente de un crisol de carbón, metido en un bloque de caliza.

El arco brota entre dos electrodos horizontales de carbón, que pasan por dos agujeros abiertos en las paredes del horno, y que son conducidos por dos correderas que permiten acercarlos o separarlos según se desee.

Por medio de este aparato, parece que Moissan ha reproducido el diamante, fundiendo hierro, con carbón, en un crisol de carbón de retorta, y sumergiendo luego este crisol en agua fría. Disolviendo, después, el hierro por el ácido clorhídrico obtenía un residuo formado, en parte, por diamantes microscópicos. También fué con el horno eléctrico con lo que preparó el carburo de calcio, efectuando la reducción de la cal por el carbón. Asimismo, por la reducción de sus óxidos en el horno eléctrico, ha obtenido gran número de metales raros.

En la industria, se prepara también el carburo de calcio en hornos de diferentes sistemas, que derivan del de Moissan. El aluminio y sus aleaciones se obtienen descomponiendo, a la elevada temperatura del arco, alúmina y criolita (procedimientos de Minet, Héroult y Cowles).

Electro-siderurgia. — Es el conjunto de los procedimientos que permiten la preparación eléctrica de las fundiciones y de los aceros. En la electro-siderurgia la función de la corriente consiste sólo en elevar la temperatura, siendo las reacciones las mismas que en los procedimientos corrientes. La temperatura muy elevada permite a las reacciones ser más completas, y liquida completamente las escorias, y así se pueden eliminar fácilmente; en fin, con la calefacción eléctrica se puede operar en atmósfera neutra, al abrigo de la acción oxidante del aire.

La siderurgia eléctrica no se puede emplear prácticamente sino en los países donde haya saltos de agua para que cueste poco la producción de la energía eléctrica.

Citaremos como ejemplo el alto horno Keller y el horno Héroult, para la fabricación del acero. La figura 988 es una sección del alto horno Keller. El mineral, adicionado de fundente, baja progresivamente; el arco brota entre dos enormes electrodos de carbón EE', con un gasto de corriente de varios miles de amperios. La fundición se reúne abajo y la escoria encima.

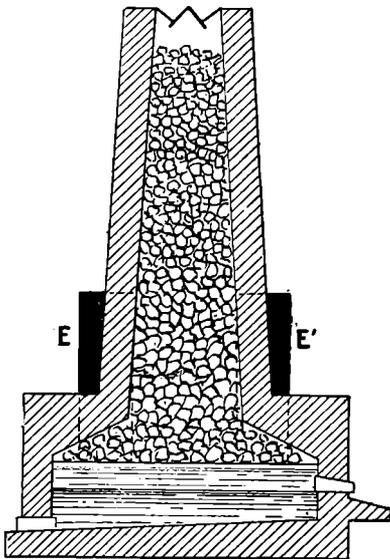


Fig. 988.

Con un alto horno eléctrico se preparan fácilmente fundiciones especiales (ferro-silicio, ferro-manganeso, ferro-cromo, ferro-tungsteno) que difícilmente se pueden obtener con el alto horno ordinario.

El horno Héroult, para afinar el acero, reemplaza al de Martin-Siemens. Compónese de un crisol que contiene el baño metálico (fig. 989), cuya

tapa está atravesada por dos electrodos verticales movibles EE'; entre el baño y cada electrodo se establecen dos arcos. El hierro fundido sale por una colada lateral ladeando el horno, que es movable al rededor de un eje horizontal.

3° *Hornos de inducción.* — Estos hornos constituyen un verdadero transformador moderador de tensión. El baño metálico está dispuesto

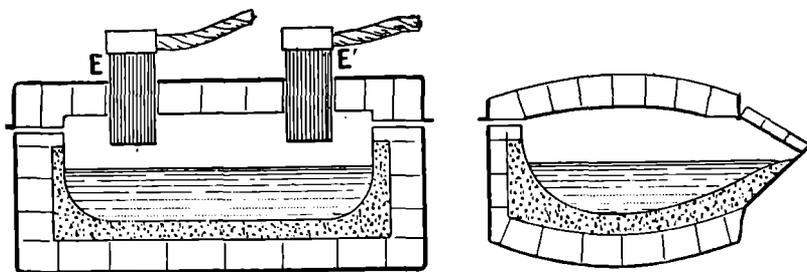


Fig. 989.

de manera que sirva de secundario : se le somete a la acción de una corriente primaria alterna, que determina en el baño corrientes inducidas de gran intensidad, que desprenden cantidad de calor considerable. Los hornos de inducción no han dado resultados tan satisfactorios como los precedentes.

III. *Trabajo eléctrico de los metales.* — La calefacción eléctrica se utiliza para trabajar los metales, principalmente para hacer soldaduras *autógenas*. Calientanse directamente las piezas metálicas por soldar, por medio del arco eléctrico.

1009. **Empleo de la energía eléctrica en la fijación del nitrógeno de la atmósfera.** — La energía eléctrica se ha empleado también para producir compuestos en que entra el ázoe de la atmósfera.

1° El nitrógeno y el oxígeno del aire pueden combinarse por la acción de la chispa, del efluvio y del arco eléctrico. De este modo se obtiene óxido nítrico AzO , que, oxidándose en presencia del aire y del agua, da ácido nítrico AzO^3H . Haciendo actuar este ácido sobre caliza, se obtiene un nitrado de calcio y puede esperarse que la fabricación eléctrica pueda remediar el agotamiento de los yacimientos de nitrato de sosá de Chile, que, actualmente, producen la mayor parte de los abonos nitrogenados y del ácido nítrico destinado a la fabricación de explosivos.

La preparación eléctrica del ácido nítrico y de los nitratos ha dado lugar a numerosos trabajos entre los cuales citaremos los de Rayleigh y Berthelot. Dougal y Howles han obtenido resultados muy prácticos y, luego, Birkeland y Eyde que utilizaron un arco alterno accionado por un electroimán.

2° *Cianamida cálcica.* — También se fija el nitrógeno del aire en estado de *cal nitrogenada*, o *cianamida cálcica* ($CaCaz^2$), por el procedimiento de Frank y Caro, haciendo actuar el nitrógeno del aire sobre carburo de calcio, producto de la energía eléctrica. La cal nitrogenada obtenida de este modo sirve para abono. En contacto con el agua pro-

duce amoniaco. Esta propiedad se aprovecha para la obtención de compuestos amoniacales.

1010. Producción del ozono. — Depuración de las aguas. — Se han construido muchos aparatos de efluvios eléctricos para ozonizar el oxígeno del aire a fin de esterilizar las aguas destinadas a la alimentación. Se emplea un generador de corriente alterna de alta tensión y se ponen sus polos en comunicación con uno de los electrodos entre los cuales circula aire. Es necesario impedir la formación de los arcos.

1º *Ozonizador Siemens.* — En el ozonizador Siemens, uno de los electrodos está aislado por una lámina de vidrio; pero, a veces, ocurre que brote un arco y rompa el vidrio.

2º *Ozonizador Otto.* — Para remediar este inconveniente, Otto ha inventado ozonizadores sin dieléctrico, en los que, por una disposición ingeniosa de los electrodos, uno de los cuales es móvil, el arco se apaga en cuanto se forma.

APLICACIONES DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS

1011. Aplicaciones de los motores eléctricos a las máquinas y útiles. — La transmisión del trabajo de una máquina central, de vapor o hidráulica, a las diversas máquinas-útiles de una fábrica, se efectúa ventajosamente del modo siguiente. Se acciona, mediante la máquina, una dinamo generatriz y la corriente es llevada a motores destinados a su vez a hacer funcionar las máquinas-herramientas. De esta manera, puede transmitirse a diversas instalaciones la corriente de una gran estación generatriz más o menos lejana.

El motor eléctrico se presta a las aplicaciones más variadas. Con él se hacen potencias muy distintas, desde los pequeños motores que actúan ventiladores hasta los poderosos motores de tracción. Pueden utilizarse para mover máquinas de coser, bombas, turbinas de refinarias de azúcar o de lavaderos, los puentes giratorios de las fábricas, los tornos y todas las herramientas de un taller de construcción.

Hasta ahora, los motores más usados han sido los de corriente continua; pero la extensión de las distribuciones por corriente alterna desarrolla cada vez más el empleo de los motores de corrientes alternas simples o de tres fases.

Draga Bunau-Varilla de movimientos eléctricos. — Entre las máquinas más interesantes que la energía eléctrica pone en movimiento, citaremos la *draga eléctrica*, inventada y empleada por Bunau-Varilla (fig. 990). Es una draga ordinaria; pero en que la cadena de los cubos G y los diversos mecanismos están gobernados por una corriente eléctrica conducida desde tierra por cables. Además, en vez de fijarla en el sitio en que debe trabajar, por medio de anclas y amarras, — como se efectúa con las dragas ordinarias — se emplea un mecanismo mucho menos engorroso. Está constituido por un pilote metálico P, muy pesado, que se eleva eléctricamente y se suelta luego, de modo brusco, para hincarlo de un solo golpe en el fondo del agua. Se halla colocado a popa, y en el mismo eje de la draga.

La draga puede girar alrededor de dicho pilote para limpiar una región extensa del fondo. Este movimiento que se llama *mariposeo*, está determinado por una o dos hélices

laterales H, H' (fig. 90). Cuando la draga ha perforado la zona MN, se la cambia de lugar para que perforo otra zona M' N'. Para esto, se planta un segudeo pilote P próximo

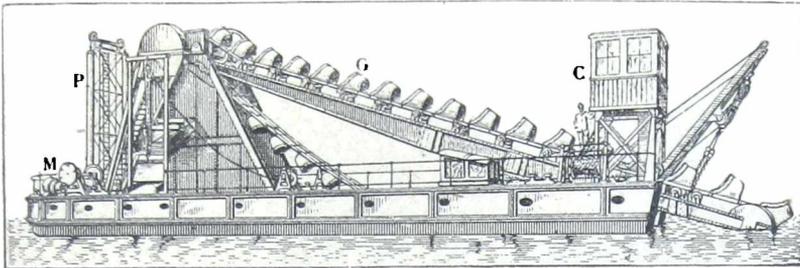


Fig. 90.

al primero, y luego se levanta P. La corriente del río, que va en el sentido de la flecha F, arrastra la draga a la posición indicada en línea de puntos. Se vuelve a plantar el primer pilote, que se halla en P₁, y se levanta P'. La draga queda así dispuesta a limpiar M'N'.

El personal que se requiere es de lo más reducido. En el proyecto que Bunau-Varilla concibió y preparó en vista de la perforación del istmo de Panamá, preveía el empleo de 16 dragas que, con un personal de 96 hombres, deberían utilizar una potencia de 50 000 caballos y limpiar 4 800 000 metros cúbicos por mes.

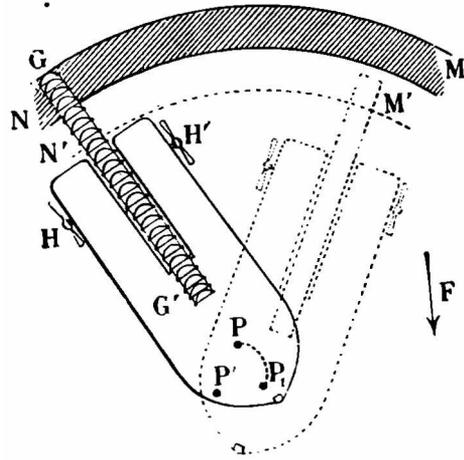


Fig. 91.

1012. **Tracción eléctrica.** — Una de las aplicaciones más importantes de los motores eléctricos es la de los tranvías y ferrocarriles. En efecto, los motores eléctricos son tan susceptibles de empleo que se presta admirablemente a tal aplicación,

El par motor que producen es máximo cuando la máquina no da aún vueltas; disminuye a medida que la velocidad aumenta, porque el inducido produce una fuerza contraelectromotriz cada vez mayor. La interrupción o debilitación de la corriente por el juego de resistencias a propósito permiten hacer variar, a voluntad del mecánico, la potencia del motor según la constitución del terreno recorrido. Además, es fácil cambiar el sentido de la marcha, invirtiendo la corriente en el inducido o en el inductor.

1013. **Tranvías eléctricos.** — I. *Motores.* — Los motores de tranvías son generalmente de corriente continua. Como están expuestos a vibraciones y choques violentos, conviene dar gran solidez a las piezas, sin aumentar el peso exageradamente. Los motores del sistema Thomson-Houston, muy usados en Francia, están protegidos por una caja de fundición que forma parte de los inductores.

Los coches son, generalmente, automóviles; dos de los ejes reciben el movimiento de uno o dos motores. Como los inducidos de los motores giran en general a una velocidad mucho más grande que la que conviene dar a las ruedas del coche, se reduce esta velocidad por medio de engranajes o cadenas. En el coche Thomson-Houston, dos motores empujan separadamente los dos ejes: los cuadros donde se apoyan las traviesas que sos-

tienen los motores, llevan barrederas. El todo forma un vagón independiente de la caja del coche que se puede separar fácilmente. En caso de accidente en los motores, no hay más que reemplazar el vagón por otro.

II. *Generación de la corriente.* — La corriente eléctrica que utilizan los tranvías, la produce una fábrica central, que puede estar más o menos lejos del punto de utilización. Las dinamos generatrices están movidas por motores de vapor o hidráulicos. Cuando la fábrica está lejos, la corriente es producida en forma de corriente alterna, de una o varias fases de alta tensión, que en una o más estaciones inmediatas de la línea se transforma en corriente continua, generalmente bajo una tensión de 500 a 600 voltios — tensión bastante elevada para ser económica (porque no exige grande gasto de energía en los conductores), poco elevada para ofrecer peligro.

III. *Transmisión de la corriente.* — 1° *Cable aéreo y trole.* — El sistema de transmisión mucho más económico consiste en enlazar un polo de las generadoras con un cable aéreo que sigue toda la línea y está sostenido de trecho en trecho por soportes aislados: el otro polo está en comunicación con los railes, unidos eléctricamente. El carruaje lleva una pértiga de hierro terminada en una polea, llamada *trole*, que está unida eléctricamente a un polo del motor, mientras que el otro polo comunica con las ruedas del carruaje. Unos resortes fuerzan al trole a apoyar bien sobre el cable que sigue. De este modo se lleva la corriente al motor, y vuelvo a la generadora por los railes. El inconveniente de este sistema, es que

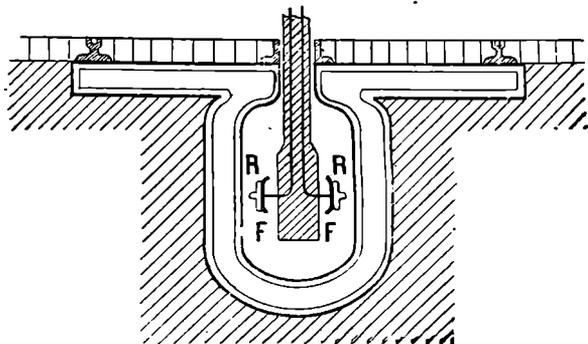


Fig. 992.

on general presenta un aspecto feo. sobre todo cuando hay en la vía curvas de poco radio que obligan a tender el cable sobre alambres de suspensión horizontales; por esta razón no se tolera en el centro de París, sino en las afueras y barrios excéntricos.

2° *Conductores subterráneos.*

— En algunas líneas de tranvías, los polos de la máquina generadora comunican con dos railes RR (fig. 992), aislados en una cuneta colocada debajo de la vía del tranvía. Esta cuneta comunica con el exterior por una ranura practicada en su

bóveda. El coche lleva una pieza llamada *pala de toma de corriente*, que atraviesa la abertura de la cuneta. Tiene también dos alambres aislados que comunican con los motores del coche y que terminan, abajo, por dos frotadores FF que resbalan sobre los carriles y transmiten así la corriente al motor.

El mayor inconveniente del sistema de cuneta es su precio elevado; pero no ofrece peligro de ninguna clase y no perjudica a la estética de las calles que recorre.

3° *Cable subterráneo y plot (pocillo).* — Este sistema consiste en colocar entre los railes de trecho en trecho, una especie de pocillos metálicos que un sistema de distribución pone en comunicación con un cable aislado, unido a uno de los polos de la generadora: en el momento en que lo toca el carruaje con la barra que lleva, transmite así la corriente al motor. El regreso se verifica por los railes. Cuando el frotador pasa de un plot para llegar al otro, queda interrumpida la comunicación entre el primero y el cable.

OBSERVACIÓN. — Este sistema no está exento de algunos peligros: sucede a veces que, por causa del mal funcionamiento de los aparatos, un plot queda en comunicación con el cable después de pasar el carruaje; entonces los dos polos de las generadoras se hallan en comunicación con puntos inmediatos del suelo: el plot y los railes; si en este caso un hombre o un caballo llega a reunir esos dos puntos por medio de su cuerpo, puede recibir una conmoción mortal.

4° *Tranvías de acumuladores.* — Ciertos tranvías llevan acumuladores cargados capaces de entretener la corriente del motor para un viaje. Este sistema presenta seguridad absoluta y permite utilizar las vías ya existentes tal como son; pero obliga a llevar en el carruaje un peso muerto considerable. El primer carruaje ensayado en 1883 por Raffard llevaba 3000 kilogramos de acumuladores Faure. Desde entonces los progresos de la construcción de los acumuladores han permitido reducir su peso, pero aun así es muy grande.

1014. **Ferrocarriles eléctricos.** — Actualmente, existen numerosas líneas de ferrocarriles equipadas eléctricamente.

El sistema más en boga aún consiste en producir energía eléctrica en forma de corrientes de tres fases de alta tensión. Estas corrientes se transmiten a estaciones secundarias que las transforman en corrientes continuas de 550 a 600 voltios y esta corriente es la que alimenta los motores de los trenes.

De todos modos, el sistema no conviene a líneas largas, porque necesitaría estaciones muy cercanas. Actualmente se trata de llevar directamente la corriente de tres fases a elevada tensión a las locomotoras, que ellas mismas disminuyen la tensión.

En el primer caso se necesitan sólo dos contactos. Generalmente, la vuelta se efectúa por los carriles; y el segundo contacto es recogido por un frotador que lleva la locomotora y resbala sobre un carril lateral aislado que comunica con el polo aislado de la generatriz.

Metropolitano de Paris. — Esta solución es la que se ha adoptado en este ferrocarril. En sus trenes no hay verdadera locomotora eléctrica, sino coches que llevan motores eléctricos, llamados automotores. Según su longitud, los trenes se componen de dos o tres coches automotores, y en cada uno de éstos hay dos motores de 125 caballos en las bogías del avatrén. Los distintos motores están equipados eléctricamente de modo que se pueda conducir al tren por uno cualquiera de entre ellos; cada coche se alimenta por sí mismo por sus propios frotadores; pero las maniobras necesarias para coordinar esta alimentación autónoma, se operan por servomotores automáticos.

La corriente de tres fases de alta tensión se produce en la fábrica central de Bercy algunas estaciones secundarias la transforman en corriente continua de 550 a 600 voltios.

Ferrocarril Nor-Sur de Paris. — Este, que es bastante análogo al metropolitano, difiere notablemente por el equipo eléctrico. Este comprende un rail aislado a + 600 voltios y un conductor aéreo a — 600; estando los carriles en el potencial cero. Cada tren lleva dos motrices con cuatro motores de 125 caballos. Una motriz toma la corriente entre el rail aislado y los carriles de tracción; la otra la toma entre el conductor aéreo y los mismos carriles. De este modo éstos carriles están recorridos por dos corrientes en sentido inverso, que se destruyen por ser casi iguales sus intensidades. Esta disposición es económica, porque utiliza una tensión total de 1200 voltios, es decir dos veces más elevada que en el metropolitano.

Electrificación de las grandes líneas de ferrocarril. — Locomotoras eléctricas. — La tendencia de hoy es reemplazar la tracción a vapor por la tracción eléctrica en las grandes líneas de ferrocarril, principalmente en las regiones montañosas, donde los saltos de agua suministran la energía eléctrica a poco precio. Por lo general, los trenes se componen de carruajes ordinarios arrastrados por una locomotora eléctrica.

Varias son las soluciones adoptadas para estas máquinas.

1º *Empleo de la corriente continua.* — Generalmente, se emplea el motor de corriente continua, pues tiene la ventaja de que su velocidad se adapta automáticamente al esfuerzo resistente determinado por la pendiente de la vía y por el peso del tren; al arrancar produce un par motor muy grande. Las variaciones de velocidad se obtienen fácilmente poniendo en derivación los inductores por medio de resistencias más o menos grandes, y por el acoplamiento de dos motores, sea en serie, sea en paralelo. Pero este motor no puede soportar tensiones superiores a 750 voltios. Por consiguiente necesita una corriente intensa. Esta corriente proviene de otras estaciones, que a su vez reciben corrientes de tres fases de alta tensión (5000 a 6000 voltios generalmente) que ellas transforman en corriente continua. Esta transformación se efectúa por medio de máquinas conmutadoras, que son muy delicadas y necesitan una vigilancia constante. Para evitar esto se ha tratado de proveer directamente la corriente alterna a las locomotoras, según las soluciones siguientes.

2º *Empleo de las corrientes enderezadas.* — Esta solución, que permite usar motores de corriente continua, se ha aplicado a la locomotora Auvvert y Ferraud (ensayo de 1912 en la línea de Cannes a Grasse). La corriente que recibe la máquina es alterna simple (12 000 voltios, 25 períodos); su tensión está moderada en la locomotora por dos transformadores estáticos, que alimentan los enderezadores. Estos dan la corriente (tensión 300 voltios) a cuatro motores de 400 caballos.

3º *Empleo de las corrientes de tres fases.* — Estas necesitan tres contactos, dos con los cables aislados, y el tercero con los rieles de tracción, y se las comunica generalmente a la locomotora con una tensión moderada (3 000 voltios). Los motores de corrientes de tres fases presentan el inconveniente de no tener un rendimiento elevado sino para una velocidad próxima del sincronismo; por otra parte, el arranque se efectúa introduciendo

una resistencia en el inducido, lo cual disminuye el rendimiento. Estos defectos son causa de que se empleen poco los motores de tres fases.

4º Empleo de la corriente alterna de una fase. — La corriente alterna de una fase para mover motores de colector, se va empleando cada vez más en los ferrocarriles eléctricos.

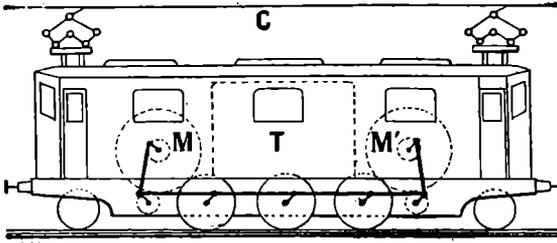


Fig. 993.

En efecto, este motor tiene las mismas cualidades que el motor de corriente continua. Exige una tensión máxima de 750 voltios; pero ésta se puede obtener con un transformador estático fijo en la locomotora.

La figura 993 muestra la disposición esquemática de una locomotora de corriente de una fase destinada al ramal pirenaico de la compañía del Mediodía. La corriente de una fase, a 10 000 voltios, llega por un rail aéreo C, contra el cual fro-

tan *pantógrafos* que lleva el carruaje, los cuales conducen la corriente a un transformador T moderador de tensión, que a su vez alimenta dos motores M y M' de 800 caballos cada uno. Dos ejes auxiliares de tres ruedas motrices acopladas transmiten la rotación a estos motores. La corriente primaria vuelve por los carriles de tracción.

1015. **Automóviles eléctricos.** — Estos carruajes accionados por motores eléctricos llevan acumuladores que suministran la energía. La primera aplicación de este género se debe a Ayrton, que construyó en 1882 un triciclo eléctrico. Jeanteaud construyó en 1887 el primer carruaje eléctrico. Estos automóviles han sido perfeccionados después por Darraq, Krieger, Milde, etc. Las ventajas que tienen sobre los carruajes de petróleo, son: seguridad absoluta, carencia de ruido, de trepidación, de calor y de olor; pero necesitan cambiar de tiempo en tiempo los acumuladores, que, con el motor, tienen un peso considerable. Este peso podría disminuirse empleando acumuladores de hojas de plomo más delgadas; pero entonces se usa pronto la batería.

CAPÍTULO III

TELEGRAFÍA

1016. **Definiciones.** — **Diversos órganos de un telégrafo eléctrico.** — La telegrafía tiene por objeto la transmisión casi instantánea, a grandes distancias, de la escritura por medio de la corriente eléctrica.

Principio. — Supongamos que en la estación transmisora se halle un generador de corriente, por ejemplo, una pila, y un interruptor, y en la estación receptora, un electroimán. Para evitar el tener que unir las estaciones por dos alambres, se pone, en la de salida, un polo de la pila en comunicación con la tierra, por medio de una placa metálica sumergida en el suelo. El otro polo de la pila comunica con un *hilo de línea* que une las dos estaciones; pero por medio del interruptor. A la llegada, el hilo de línea comunica con uno de los extremos del alambre del electroimán, cuyo otro extremo comunica con la tierra. Se ve que, si se cierra el interruptor, la corriente de la pila pasa por el circuito, haciéndose el regreso por el

suelo : el electroimán atrae su armadura. La corriente cesa y la armadura dejará de ser atraída cuando se abra el circuito por medio de un interruptor de salida. De este modo, se concibe cómo pueden transmitirse signos de una estación a otra.

OBSERVACIÓN. — El regreso por el suelo ofrece la doble ventaja de economizar un alambre y de hacer menor la resistencia del circuito.

Los diversos órganos de un telégrafo son :

- 1º El *generador de corriente*;
- 2º El *hilo de línea*;
- 3º El *manipulador*, que regula las intermitencias de la corriente en la estación de partida;
- 4º El *receptor*, que registra los despachos en la estación de llegada.

1017. Hilo de línea. — Se distinguen las *líneas aéreas, subterráneas y submarinas*.

Línea aérea. — La línea aérea consiste en un alambre de *hierro galvanizado* de 3 a 5 milímetros de diámetro, según la longitud de las líneas. También se usan conductores de cobre en aleación con silicio de 1 a 4 milímetros de diámetro. Estos alambres están sostenidos por campanas aisladoras (fig. 994), de porcelana o de vidrio montadas en consolas fijas en la parte superior de postes que se plantan a intervalos de 50 a 100 metros.

Línea subterránea. — Hablando en general, el conductor usado en las líneas subterráneas está formado por varios alambres de cobre (3, 5 o 7) de pequeño diámetro, torcidos unos con otros de modo que formen cuerda. Esta se cubre con una gruesa capa de gutapercha, constituida de ordinario por varias capas superpuestas y pegadas entre sí mediante la *composición Chatterton*. La gutapercha está protegida por una cubierta que compone de pedazos de yute y cintas de algodón empapados en alquitrán de madera. El conductor así preservado es uno de los *hilos* de un *cable* que generalmente comprende 3, 5, o 7, según los sitios donde se les va a colocar (cloacas, túnel, o la tierra).

Los cables están protegidos a su vez de manera diferente. En cloacas y túneles se les da de ordinario una cubierta de plomo: cuando pasan a través del suelo se usa el *cable armado*, llamado así porque está provisto de una *armadura* de alambres de hierro arrollados en forma de hélice.

Las líneas subterráneas a grandes distancias se hacen con cables armados o protegidos con cubiertas de yute y algodón, que pasan por tubos de fundición análogos a los que sirven para conducir el agua, y enterrados en el suelo a la profundidad de 1 metro próximamente. De distancia en distancia y en puntos conocidos se prepara una cámara para facilitar las pesquisas en caso de desarreglo o accidente.

Línea submarina. — La línea submarina está constituida por un cable armado, de un conductor solo o de varios, preparados como los de las líneas subterráneas; los cables de gran longitud son ordinariamente de conductor único. La envoltura protectora de éste se hace con mucho cuidado mediante capas concéntricas de estopas y cáñamo empapados en sulfato de cobre. Los alambres de hierro y de acero de la armadura exterior están cubiertos a su vez de cáñamo alquitranado (fig. 995 y 996), y la fuerza de esta armadura se proporciona a los efectos destructores que deberá resistir en los fondos donde será sumergida; así es que se distinguen los *cables costeros* de los *cables de grandes profundidades*, que son más ligeros.

OBSERVACIÓN. — Fuera de las causas de ruptura que resultan del frote continuo de los cables sobre las rocas, en los sitios donde corrientes continuas agitan el mar, y de las que pueden resultar del encuentro con el ancla de un navio, las líneas submarinas tienen que sufrir los ataques de la *carcoma*, un animal infinitamente pequeño que perfora la gutapercha a través de los intersticios de la armadura. Los agujeros que ese insecto

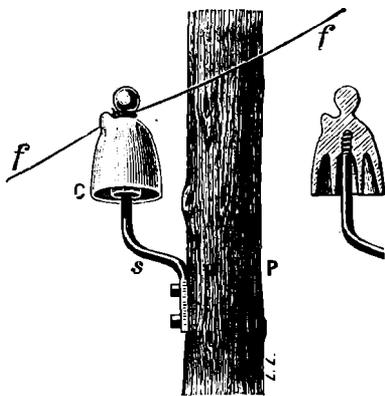


Fig. 994.

haco son microscópicos; pero como en ciertas regiones se cuentan por miles, resulta una alteración apreciable del aislador del conductor, que se pone en comunicación con

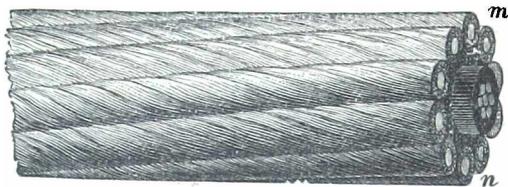


Fig. 995.



Fig. 996

el agua del mar. Las descomposiciones químicas producidas en esos puntos por la acción de las corrientes eléctricas activan por lo demás la deterioración y dejan inútil en poco tiempo el cable.

1018. Generadores de corrientes. — 1º *Pilas.* — Entre los generadores de corriente usados en telegrafía, citaremos la pila Callaud y las pilas similares. El elemento Leclanché, del modelo ordinario, es también muy usado en líneas de tráfico relativamente poco importante; lo mismo ocurre con las pilas secas fundadas en igual principio. También se emplean las de Lalande y Chaperon, y el elemento Fuller (zinc amalgamado, carbón, agua acidulada y bicromato de potasa) utilizado en Inglaterra por el *Post Office*.

2º *Dínamos y acumuladores.* — Por lo menos en los grandes centros, todos estos generadores de electricidad serán substituidos en breve por acumuladores, periódicamente cargados con máquinas dínamos.

3º *Intensidad de las corrientes telegráficas.* — La corriente enviada por el puesto expedidor y calculada en el momento de salida tiene generalmente en Francia intensidad de 12 a 20 mili-amperios: esto es lo que se llama la *corriente de acción*. La que actúa sobre el receptor, la *corriente recibida*, alcanza apenas de 20 a 70 por 100 de la corriente de acción, por causa de las pérdidas que hacen sufrir las derivaciones, la longitud de la línea y el estado de la atmósfera; de modo que el receptor no recibe más que de 3 a 8 mili-amperios.

1019. Telégrafo de cuadrante o de letras: sistema Breguet. — Existen varias clases de telégrafos de cuadrante. He aquí el principio de los de Breguet instalados en las estaciones de caminos de hierro y en muchas oficinas secundarias.

El aparato se compone esencialmente de un manipulador (fig. 997) y de un receptor (fig. 998). Cada uno de estos dos órganos tiene un cuadrante con las letras del alfabeto. El manipulador tiene una palanca que se puede llevar a las letras de las palabras que se van a transmitir. El receptor tiene una aguja, que, por el mecanismo que vamos a describir, se para sucesivamente delante de las letras transmitidas.

Receptor. — La corriente, que sale de la estación de partida a través del manipulador y del hilo de línea, entra en el receptor. Un electroimán, atrae una armadura de hierro dulce que forma parte de una palanca acodillada móvil en torno de su punto de apoyo, mientras que un muelle espiral solicita la misma palanca en sentido contrario.

Sobre el extremo superior de la palanca, cuyo movimiento está limitado por dos contactos, apoya un diente de una rueda movida por un sistema de relojería, que gira en el sentido de la flecha, y se para cuando el diente tropieza contra la palanca. Esta rueda tiene 13 dientes, y otra idéntica está fija, por delante, en el mismo eje, alternando sus dientes con los de la otra. El eje común lleva una aguja que se mueve en el cua-

drante del receptor, que contiene 26 signos (las 25 letras del alfabeto (francés) y una cruz entre las letras A y Z) que corresponden a los 26 dientes.

Cuando pasa la corriente, el electroimán atrae a su armadura, el diente que estaba sujeto queda libre y la rueda avanza por la acción del movimiento de relojería; en seguida se para al tropezar con otro diente: de modo que el sistema sólo avanza un vigésimo sexto de vuelta.

Luego la aguja habrá avanzado el espacio de una letra en el cuadrante. Si cesa la corriente, el electroimán queda inactivo y el muelle retira atrás la armadura y así queda libre la rueda anterior. De este modo la aguja avanzará de una letra a otra cada vez que se abre y cierra el circuito de la pila.

Manipulador. — Las intermitencias del electroimán se producen con el manipulador (fig. 997). La palanca manipuladora arrastra un círculo con una garganta sinuosa con 13 concavidades y 13 convexidades, en la que penetra el extremo de la palanca móvil en torno de un eje O y el otro extremo oscila entre los dos contactos *a* y *b*. Por el muelle *r*, la palanca está en comunicación con el alambre de la línea. El tope *a* está unido a uno de los polos de la pila y el otro polo comunica con el suelo, así como el extremo del alambre del electroimán receptor.

Se ve que si se da vuelta al manipulador, la palanca, tocando sucesivamente *a* y *b*, cerrará y abrirá alternativamente el circuito cada vez que se pase delante de una letra del cuadrante.

Por consiguiente, si se avanza al manipulador 4 letras, por ejemplo, la corriente pasa dos veces y queda interrumpida otras dos. Luego el electroimán del receptor se vuelve dos veces atractivo y deja de serlo otras dos. Luego la aguja del receptor avanza cuatro letras como el *manipulador*.

Cuando ha terminado la palabra, se lleva el manipulador a la cruz, y en el cuadrante del receptor se produce el mismo movimiento.

1020. Telégrafos de señales registradas. — Sistema Morse y sus derivados. — 1° Manipulador. — En el *aparato Morse* propiamente dicho, la señal se forma por el manejo de la *palanca-manipuladora*.

Consiste en una palanca *ab* (fig. 999), susceptible de oscilar entre un tope *b*, llamado *tope de reposo*, contra el cual le aplica en tiempo ordinario un resorte, y otro tope *x*, llamado *tope de trabajo*, sobre el cual va la palanca a tomar un punto de apoyo cuando la mano del operador la baja. La *duración* del descenso de la planca,

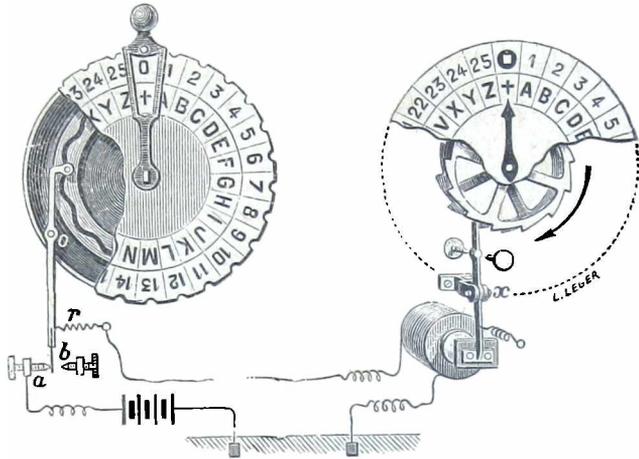


Fig. 997.

Fig. 998.

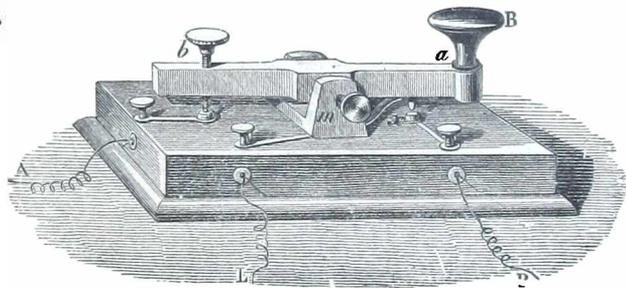


Fig. 999.

La *duración* del descenso de la planca,

y por consiguiente la del contacto que de ahí resulta entre ella y su tope de trabajo, puede ser *breve* o *larga*: así es cómo se han constituido los dos elementos del *código de señales Morse*.

2º *Receptor*. — Las emisiones de la corriente de la estación de salida van

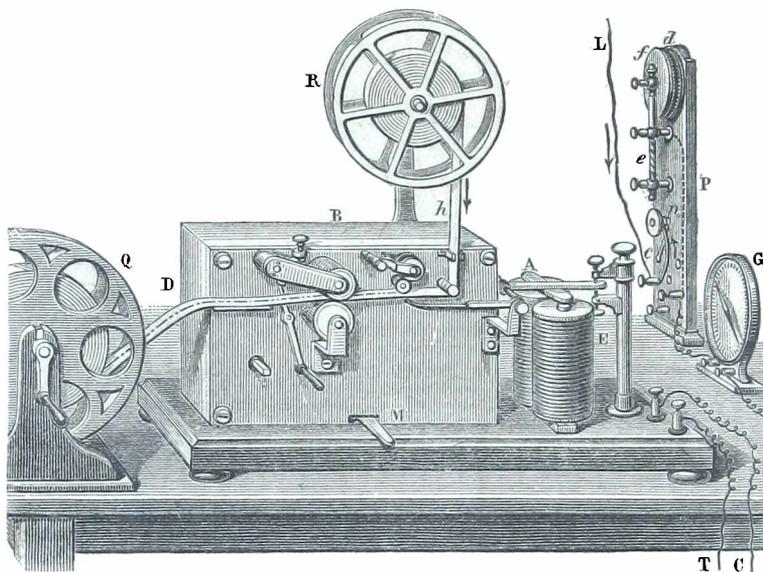


Fig. 1000.

a ejercer acción sobre el receptor de la estación de llegada (fig. 1000, 1003). La palanca *l* (fig. 1003) que sostiene la armadura *A* del electroimán *E* está provista de una prolongación *u* cuyo extremo encorvado se presenta por debajo y bastante cerca del filo de una rueda delgada *m*; ésta se encuentra constantemente untada de tinta por su contacto permanente con un rodillo de fieltro *e* empapado de tinta oleica negra o azul. La rueda *m* es designada por el nombre de *moleta* y el rodillo

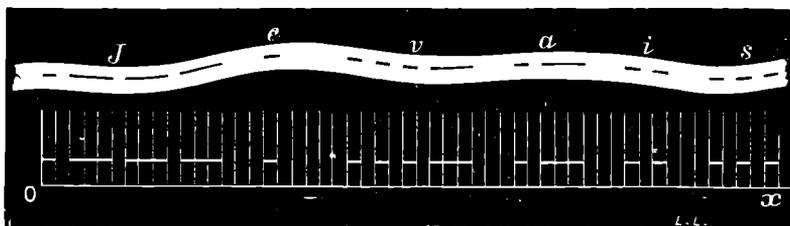


Fig. 1001.

e se llama *rodillo entintador*. Ambos giran por la acción de un mecanismo de relojería de que forman parte y que está contenido en la caja *BD* (fig. 1000). Un rollo de papel *R*, dispuesto encima, suministra una tira continua de papel *h*, que va a ponerse en contacto de la extremidad de la lámina encorvada *u* y es movida con velocidad uniforme por dos cilindros *c. c* (fig. 1003). Concíbese que toda atracción de la armadura *A*

por el electroimán E tendrá por resultado levantar la banda de papel hasta llegar a ponerla en contacto de la rueda entintada : ésta dará tinta suficiente para formar un trazo cuya longitud dependerá de la duración del contacto, puesto que la banda continúa su movimiento de progresión durante este tiempo. Las señales breves efectuadas por medio del manipulador en la estación de salida, serán por tanto registradas en la de llegada por trazos de pequeña dimensión (*puntos*), y las señales largas por trazos mayores (*lineas*).

Existe gran número de aparatos que tienen todos por objeto fijar en la banda de papel líneas de tinta : el que acabamos de explicar es el modelo adoptado por la Administración francesa de Telégrafos. El modelo inglés hace descansar la moleta entintada sobre una palanca articulada que la armadura gobierna.

3º *Ritmo de los signos.* — El ritmo según el cual se efectúan los signos del aparato Morse lo indica el esquema de la figura 1001, en el que las divisiones del eje de los tiempos *Ox* corresponden a diez y seis avos de segundo. Esto es una velocidad media práctica.

4º *Lectura de los signos Morse.* — *Tabla del comandante Perein.* — Una ingeniosa tabla (fig. 1002) debida al comandante Perein permite, ora traducir rápidamente los signos Morse, ora componer fácilmente los signos que representan letras por transmitir.

Para la composición de los signos que representan tal o cual letra, se va desde el punto de partida señalado con flechas, a la letra que se quiere representar, siguiendo las líneas que a ella conducen. Sea, por ejemplo la letra *k* a la que no se puede llegar sino atravesando los signos — — — que forman el signo complejo que sirve realmente para representarla.

Tratemos de traducir el signo — — —. Se parte de la flecha y se siguen las líneas

pasando sucesivamente por un punto, luego una raya, otra raya, después, otro punto, y de este modo se llega a la letra *p* cuya representación indica el signo en cuestión.

En el Código Morse las cifras están formadas por 5 signos, y los signos de puntuación, por seis.

5º *Instalación completa de un puesto Morse (llegada y salida).* — *Operación.* — La palanca L del manipulador (fig. 1003) está unida por su parte media permanentemente al alambre de la línea; además, al descender bajo la mano del agente transmisor, se pone en comunicación con uno de los polos de la pila P, cuyo otro polo está en el suelo. De ahí, resulta un cierre del circuito de esta pila a través el alambre de la línea y, por consiguiente, el envío de una corriente eléctrica a la estación de llegada.

Ahí, el circuito de la línea continúa por el manipulador, por su tope de reposo Br, por los carretes del electroimán E y se cierra finalmente por la tierra. Al atravesar el electroimán, la corriente de la línea determina una atracción de la armadura A.

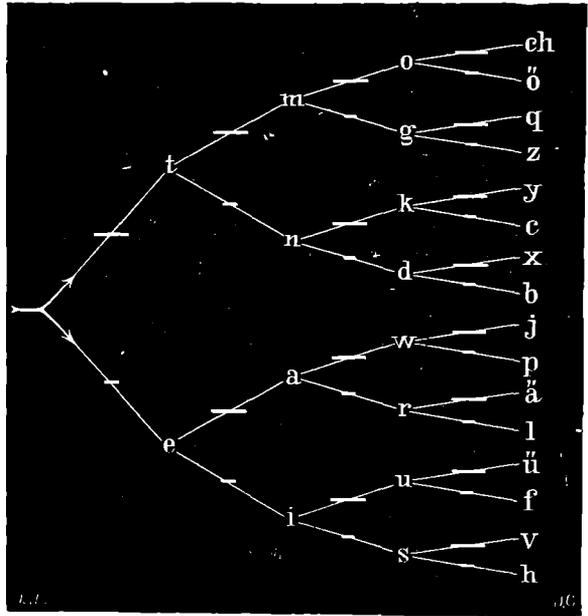


Fig. 1002.

En efecto, cuando se baja el manipulador, se separa de su tope de reposo, y así impide que se cierre el circuito del electroimán receptor de la estación de salida.

6° *Hablador Morse*. — Con frecuencia se reduce el receptor de Morse al electroimán y a su armadura, — suprimiendo así el registrador y el movimiento de relojería. El

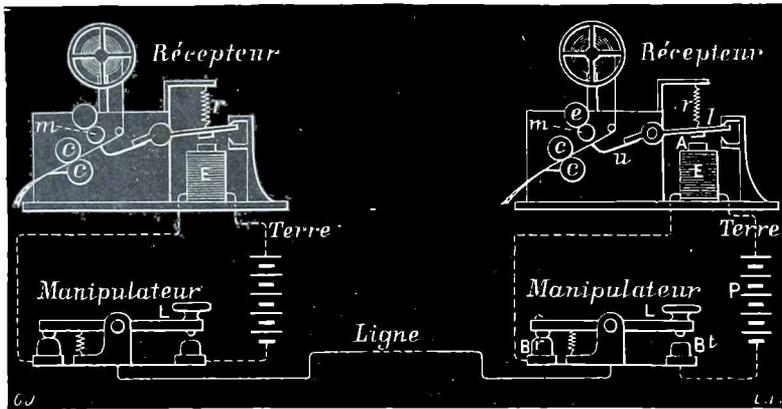


Fig. 1003.

empleado reconoce *por el sonido* los signos breves y largos. Estos receptores denominados *habladores* (o *sonadores*) están dispuestos de tal manera que resulte bien claro el ruido o sonido que produce el choque de la armadura con su tope.

Según la disposición de los aparatos, se ve bien, en cada estación, por qué la corriente lanzada desde la estación de salida no puede accionar el receptor de la misma estación.

1021. *Órganos accesorios*. — La instalación de un puesto telegráfico completo requiere gran número de órganos accesorios cuya forma es sumamente variada según los sistemas. Vamos a describir los tipos sencillos de los accesorios más importantes.

1° *Pararrayos*. — El pararrayos es un aparato destinado a preservar al telegrafista contra las descargas eléctricas en momentos de tempestad. Se le ve en su sitio (fig. 1000) adaptado a una tablilla vertical P, cerca de un receptor Morse.

Dos bornes de latón P y Q (fig. 1001) están en comunicación, el primero con el hilo de

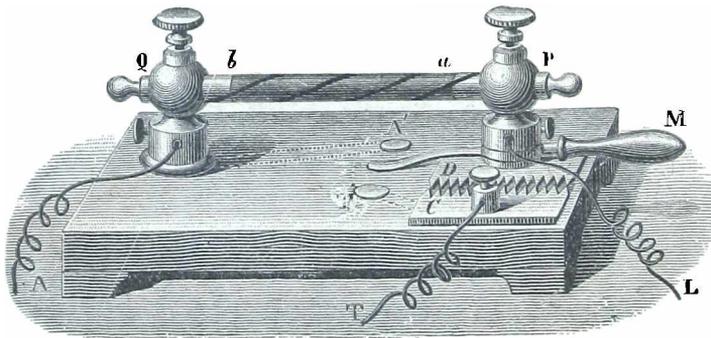


Fig. 1001.

línea L, el segundo con los aparatos por el alambre A. De un borne a otro va un rodillo de ebonita *ab*, donde se arrolla un alambre de hierro muy doblado que lleva la corriente de P a Q. Al pie del borne P hay una placa de cobre D, dentada en toda su longitud; lateralmente y muy cerca hay otra placa idéntica C que comunica con la tierra por el alambre T.

Cuando por la acción de una tempestad llega la tensión eléctrica a ser bastante grande en el hilo de línea para producir chispas temibles, la placa D, que se encuentra en el circuito, da salida por sus puntas a la electricidad hacia la lámina C y desde allí al

suelo, sin riesgo para los telegrafistas, inmediatos. Si, no obstante esta descarga continua, la corriente llega a ser demasiado intensa, el alambre de hierro arrollado de *a* a *b* se calienta hasta fundirse, cortando así toda comunicación eléctrica entre los aparatos y la línea.

Puede según se quiera ponerse el pararrayo fuera del circuito, valiéndose al efecto de un conmutador de manecilla *M*.

OBSERVACIÓN. — Los pararrayos, que bastan para preservar a los empleados, son insuficientes para detener las corrientes accidentales que las auroras boreales, las tormentas magnéticas o las acciones telúricas excitan en los hilos, corrientes que a veces llegan a ser bastante intensas para perturbar completamente la transmisión de los despachos.

2º *Timbre eléctrico (de temblador)*. — *El timbre eléctrico* es un pequeño aparato que sirve para avisar a la estación con que se va a comunicar. Hácense de varias clases; describiremos (fig. 1005) el *timbre de temblador*, usado también por los puestos telefónicos y en la economía doméstica.

Una tableta dispuesta verticalmente sostiene un electroimán *E*, a donde llega, por un borne *m*, sea la corriente de línea, sea la de una pila local. Desde allí pasa la corriente a una lámina elástica de acero *c*, que sostiene la armadura *a* del electroimán y luego a una lámina de latón *C*, que está en contacto con la armadura, y vuelve a la pila por el borne *n*.

Cada vez que la corriente penetra en el electroimán, la armadura es atraída y arrastra consigo un martillo *P*, que pega en la campana *T* y la hace sonar. Pero en el momento del choque cesa el contacto entre la armadura *a* y la lámina *C* y, como la corriente queda abierta, el electroimán se vuelve inactivo; pero la lámina de acero *c* vuelve a poner la armadura en contacto con la lámina *C*, la corriente pasa de nuevo, y así sucesivamente, con gran rapidez, mientras la corriente llega al aparato.

3º *Refuerzos*. — Si los dos puestos que corresponden están muy lejos uno de otro, puede suceder que la corriente deje de tener fuerza bastante para hacer funcionar las piezas que inscriben el despacho. Entonces se recurre a un *refuerzo*, órgano accesorio que, recibiendo la corriente de línea, introduce en el receptor la corriente de una *pila*

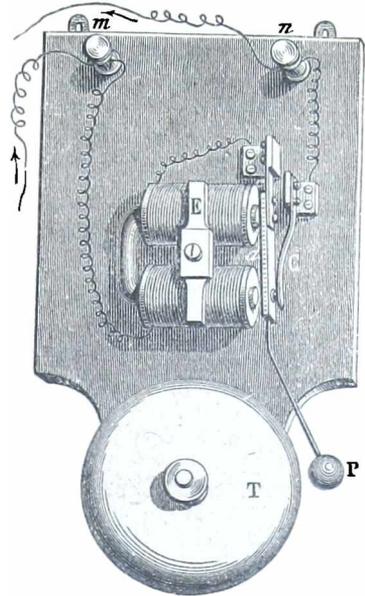


Fig. 1005.

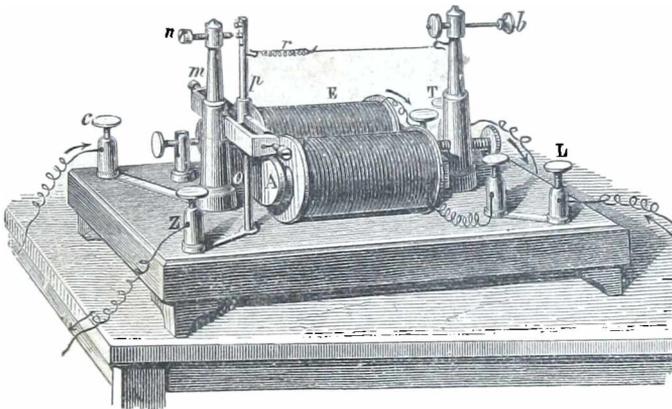


Fig. 1006.

local, que sustituye a la pila de la estación de salida para mover el mecanismo del receptor.

La corriente de línea, que entra en el aparato por el borne *L* (fig. 1006) se dirige a un electroimán *E*, desde donde va a la tierra por el borne *T*. Ahora bien, cada vez que el circuito se cierra, el electroimán atrae la armadura *A*, fija en la parte inferior de una

palanca vertical p , que está unida con un eje horizontal que gira entre dos tornillos de punta.

A cada oscilación, la palanca p va a chocar por su parte superior contra un botón n , y en este instante la corriente de la pila local va a animar al electroimán del receptor pasando por el borne c , la columna m , la palanca p , el vástago o y el borne Z , desde donde sale por el hilo T para volver a la misma pila local. Después, cuando la corriente del hilo de línea se interrumpe, como ya el electroimán del refuerzo no está en actividad, la palanca p , arrastrada por un resorte espiral r , se separa del botón n y la corriente de la pila local deja de pasar. Se ve pues que el refuerzo transmite al receptor exactamente las fases de paso y de intermitencia del manipulador del puesto expedidor.

Refuerzos polarizados. — En ciertos casos pueden emplearse *refuerzos polarizados*, llamados así porque su armadura móvil es un imán. De esta manera, según el sentido de la corriente emitida, se provoca una atracción o una repulsión de la armadura.

1022. **Telégrafos impresores.** — **Principio del sistema Hughes.** — El sistema Morse es el mejor de los telégrafos en lo tocante a sencillez y duración; pero no el más rápido (se transmiten de 500 a 600 palabras por hora, por inscripción, o de 600 a 1 000, por sonido). En efecto, con él hay que hacer tres señales por letra. Así es que se ha procurado combinar sistemas que den *una letra* por cada emisión de corriente: esto es lo que se llama *telégrafos impresores*. El más conocido es el del profesor americano Hughes con el cual se transmiten 1 400 palabras por hora.

El mecanismo de este telégrafo es bastante complicado, pero su principio muy sencillo. En las dos estaciones se encuentran dos aparatos de relojería que deben andar acordes, con sincronismo perfecto, de modo que determinen el funcionamiento simultáneo del manipulador y del receptor. Este último consiste esencialmente en un disco metálico horizontal, que lleva en su contorno, hechas en relieve, las letras del alfabeto: es la *rueda de los tipos*. Esta gira de manera continua cerca de una banda de papel que se desarrolla como en el receptor Morse. Un electroimán, que se anima cada vez que se emite la corriente por el hilo de línea, comprime el papel contra la rueda de los tipos: la letra que pasa en este momento, y que constantemente está impregnada de tinta grasa, se imprime entonces sobre la banda. La emisión de la corriente se efectúa, en la estación de salida, por medio de un *manipulador especial*, que se compone esencialmente de un teclado, análogo al de los pianos, que lleva grabadas en sus teclas las mismas letras que la rueda de los tipos. Una vez arreglados los dos aparatos, el expedidor envía sucesivamente, tocando en el teclado, las letras de que el despacho se compone, y éstas se imprimen simultáneamente en los dos puestos. Luego se cortan las bandas impresas, se pegan en una hoja de papel y se entregan de este modo al público.

1023. **Telégrafos de transmisión rápida.** — El sistema Hughes no es suficientemente expeditivo, a lo menos en las grandes líneas, para las necesidades de la correspondencia telegráfica. Ha habido que inventar varios sistemas para acelerar en gran proporción, la transmisión de telegramas por un mismo alambre de línea. Estos diferentes sistemas pueden clasificarse en tres grupos:

1º *Transmisores automáticos*, cuyo tipo es el *transmisor Wheatstone* o *Jacquard eléctrico*;

2º *Transmisores múltiples*, cuyo tipo es el *telégrafo Baudot*;

3º *Sistemas de transmisión simultánea*, conocidos por el nombre de *sistemas duplex, duplex y cuadruplex*.

Jacquard eléctrico. — *Principio.* — Se preparan de antemano los telegramas fuera de la línea; y luego, se transmiten por series, de un modo continuo, y *automáticamente*.

Aparato Wheatstone. — El aparato inventado por Wheatstone se parece exteriormente a una tejedora Jacquard, por lo cual se le ha dado el nombre que lleva. El órgano que sirve para preparar los despachos se llama el *perforador*, porque esta preparación consiste en *perforar* las bandas de agujeros que se encuentran alineados y espaciados de modo que sea posible la transmisión en caracteres Morse (fig. 1007). La línea de agujeros del centro sirve para el engranaje de un disco dentado que, al girar, arrastra consigo y desarrolla la banda de una manera continua. Las otras dos líneas de agujeros forman los *puntos* y *rayas* del alfabeto Morse: dos agujeros situados uno frente a otro forman un punto; dos agujeros en diagonal indican una raya.

El aparato transmisor lleva dos agujas, que apoyan contra la banda; los ligeros movimientos que adquieren al paso de los agujeros, se utilizan para poner la línea en comunicación, sea con el polo positivo de la pila, para una de las series de agujeros, sea con el polo negativo, para la otra serie. Entonces un punto es transmitido por una *corriente positiva*, a la que sigue inmediatamente después una *corriente negativa*; para el trazo o raya la corriente negativa tarda más en seguir a la positiva.

El receptor comprende un electroimán do armadura polarizada, atraída en un sentido por las corrientes positivas y on sentido contrario por las negativas; la armadura tiene una moleta entintada que inscribe en una cinta de papel movible los signos transmitidos.

El sistema Wheatstone permite transmitir 600 palabras por minuto, os decir 60 veces más que el Morse inscriptor.

Transmisores múltiples. — *Aparato Baudot.* — El principio de estos aparatos, entre los cuales es el de Baudot el más perfecto, consiste en lo siguiente : dividir la duración de transmisión en intervalos regulares y periódicos, cada uno de los cuales se consagra a un manipulador distinto; cierto número de empleados pueden utilizar por consiguiente el hilo de línea por turno de manera que mientras los tiempos de actividad y de reposo se suceden para ellos periódicamente y con rapidez, el hilo de línea permanece en actividad de manera continua.

El telégrafo Baudot, fundado en este principio, es una maravilla de precisión y velocidad. Permite enviar 6 despachos distintos, por un mismo alambre, en el tiempo que se tardaría en imprimir uno solo con el aparato Hughes ordinario. El órgano esencial es un *distribuidor*, que pone por turno y periódicamente en comunicación con el hilo de línea 6 manipuladores Hughes; de esta manera, en el primer periodo se manda la primera letra de 6 despachos; después, en el segundo, la segunda letra de los seis despachos, y así sucesivamente hasta la última; cada período dura el tiempo necesario a cada empleado para preparar el envío de una letra, de manera que no se pierde ni un instante en el funcionamiento del hilo de línea. En la estación de llegada hay otro *distribuidor* que funciona en sentido inverso del primero, y distribuye sucesivamente a 6 receptores Hughes distintos una letra de cada uno de los 6 despachos diferentes. Con semejante mecanismo se pueden transmitir 1080 letras por minuto, sea palabras 10590 por hora.

Sistemas duplex, diplex y cuadruplex. — Estos sistemas no están constituidos por aparatos especiales, como los anteriores, sino por métodos de transmisión simultánea que se pueden aplicar a todos los telégrafos.

El *duplex* permite transmitir simultáneamente por un mismo hilo dos despachos en sentidos contrarios.

El *diplex* permite transmitir por un mismo hilo dos despachos en el mismo sentido.

El *cuadruplex* consiste en una combinación de los dos anteriores, que permite transmitir por un mismo hilo cuatro despachos, dos en el mismo sentido y dos en el contrario.

Descripción esquemática de un duplex. — El principio de esta disposición es hacer de modo que la corriente emitida por la estación de salida no actúe sobre el receptor de la misma, que necesariamente atraviesa para ir a la línea, sino únicamente sobre el receptor de la otra estación. Las soluciones de este problema son numerosas; he aquí una de las más interesantes, que es una aplicación del puente de Wheatstone.

En cada estación hay una pila P (fig. 1008) uno de cuyos polos está en el suelo, comunicando el otro con el manipulador M. A partir del manipulador, la corriente se bifurca en dos ramas, AB, AC por una parte, y A'B', A'C' por la otra. Entre B y C de una parte y B' y C' por otra se echa el puente donde se coloca el galvanómetro. Por fin, las ramas AB y A'B' enlazan con el hilo de línea mientras que las AC y A'C' van a la tierra. Es posible, según se sabe, proporcionar las resistencias en AB y en AC, hasta que la intensidad de la corriente sea nula en el puente. Reconócese que es así cuando

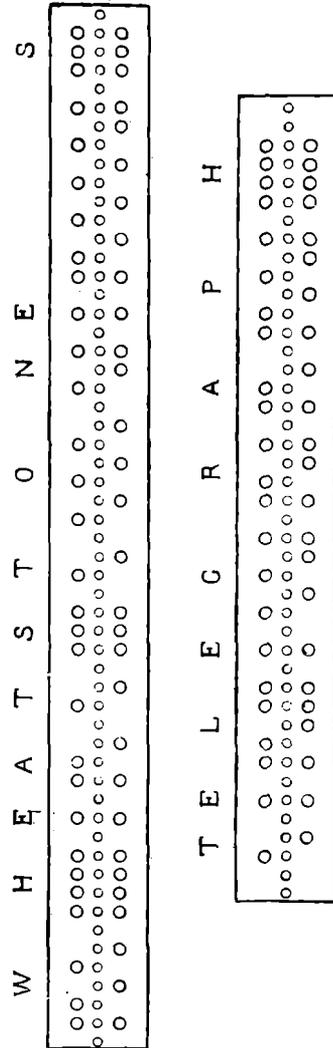


Fig. 1007.

la aguja del galvanómetro queda on el cero. En este momento ya sólo falta reemplazar el galvanómetro por el receptor, y queda montado el duplex.

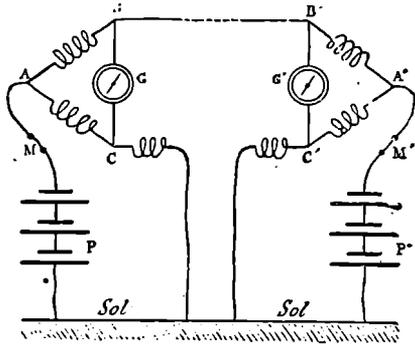


Fig. 1008.

nismos síncronos, dos puntas de hierro p , p' , la primera en el puesto transmisor, y la segunda en el receptor, describían dos sistemas de líneas paralelas deslizándose por las hojas. Los estilos pp' estaban unidos a la línea y los platillos, al suelo. Además, los polos de la pila de transmisión se hallaban unidos a la punta p y a la hoja de estaño. Cada vez que, en su movimiento, la punta p resbalaba sobre el estaño, la pila quedaba, en cortocircuito en el puesto transmisor. Por lo tanto no se enviaba ninguna corriente a la línea. Al contrario, al pasar el estilo p por la tinta grasa, la corriente era enviada a la línea y pasaba por el estilo p' ; éste, a causa de un fenómeno de electrólisis, trazaba una raya de azul de Prusia en la hoja receptora. Finalmente, obteníase es esta hoja una reproducción, en líneas paralelas, de la escritura o del dibujo por transmitir.

En el aparato Bakevell, la hoja de estaño era reemplazada por un papel impregnado de un líquido conductor, y el dibujo o la escritura eran trazados con una solución resinosa aisladora. Dicho papel quedaba enrollado en un cilindro giratorio análogo al del fonógrafo. La hoja receptora hallábase dispuesta de igual manera.

En fin, en el aparato de Edison, el dibujo y la escritura eran trazados con una punta dura, de modo a dejar un hueco en el papel, y la corriente se hallaba interrumpida cada vez que el estilo transmisor encontraba uno de estos huecos.

Recientemente (1907) Carbonnelle, en su *teleautograbador*, ha sustituido la punta p' receptora por un buril, puesto en movimiento por medio de un receptor telefónico que recibía la corriente de la línea. En el cilindro receptor, existe un rodillo de plomo que es grabado de este modo por el buril. Con ese grabado puede sacarse una o varias pruebas del sujeto transmitido que, puede ser, manuscrito, dibujo o fotografía.

También se ha tratado de transmitir el dibujo o la escritura por procedimientos electromagnéticos. En este caso se halla el *teleautógrafo* de Eliska Gray y de Gruhn. El fundamento es el siguiente: El movimiento de un punto en un plano puede ser descompuesto en dos movimientos rectangulares. Entonces, se fija al lápiz que traza los caracteres en el puesto transmisor, dos cordelitos perpendiculares entre sí que, enrollándose, o desenrollándose en dos poleas, transmiten sucesiones de corrientes en dos líneas. Estas corrientes son recibidas en la estación receptora, en dos refuerzos que hacen efectuar a dos vástagos, situados en ángulo recto, movimientos proporcionales a los de los cordelitos. Un estilo fijo en la intersección de dos varillas dispuestas en la prolongación de los vástagos, y articuladas en los extremos de éstos, reproduce los caracteres trazados por el lápiz.

Transmisión de las imágenes luminosas y fotografías. — *Aparato del Doctor Korn.* — Primeramente se ha tratado de transmitir, instantáneamente, imágenes luminosas por un procedimiento eléctrico, utilizando la propiedad que tiene el selenio de volverse conductor por la acción de la luz. Pero ninguna de las soluciones propuestas es práctica.

En estos últimos años, el doctor Korn, de Munich, ha podido realizar un aparato que permite transmitir fotografías por un procedimiento a la vez eléctrico y óptico. Korn ha ido perfeccionando sucesivamente sus aparatos; vamos a describir el principio del más reciente, construido en 1907. La fotografía por transmitir se saca en una película transparente y arrollada en un cilindro de cristal C. Una lente concontra en un punto del cilindro la luz emitida por una lámpara Nernst N (fig. 1010). Después de haber atravesado la pared del cilindro, esta luz reflejada por un prisma, ataca a una pila de

selenio S*, colocada en un circuito que comprende una pila, el hilo de línea L, y el aparato receptor.

El cilindro de cristal está animado a la vez de un movimiento de rotación y de avance siguiendo su eje. El punto luminoso describe pues, en un cilindro, una hélice de espiras apretadas. La luz pasa cuantas veces encuentra un blanco de la imagen, y queda interceptada por los puntos negros, o debilitada por las medias tintas. En la estación receptora hay una lámpara alimentada por las corrientes de alta tensión y alta frecuencia de un Tesla. Una lente concentra la luz en un punto, en una película fotográfica, enrollada en un cilindro que gira sincrónicamente con el primero. La corriente de la línea viene

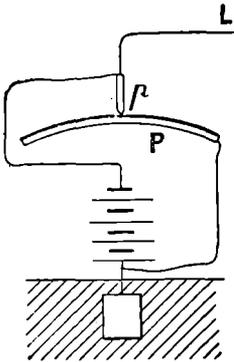


Fig. 1009.

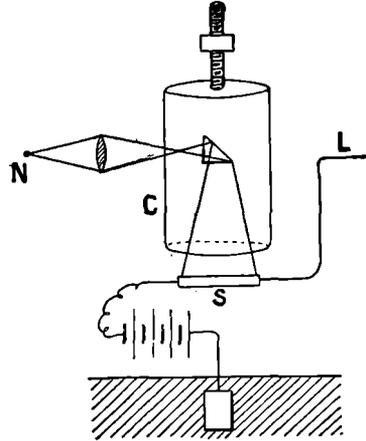
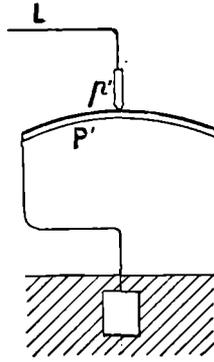


Fig. 1011.

a un galvanómetro; sus variaciones de intensidad, que hacen desviar más o menos el galvanómetro, sirven para maniobrar una especie de reóstato que modera o refuerza la intensidad de la lámpara. De este modo, la película receptora recibe impresiones variables con la intensidad de la corriente y, después de revelarla, se obtiene en la película receptora la reproducción de la fotografía transmitida.

El defecto del selenio es su *inercia*, es decir su tendencia a conservar durante cierto tiempo la conductibilidad que la luz le había comunicado, después que cesa su acción. El Dr Korn ha remediado este inconveniente empleando dos células de selenio, dispuestas de tal manera que las acciones anteriores de la luz sean iguales y se opongan. El galvanómetro se desvía según la diferencia de las variaciones de resistencia de las dos células.

A fines de 1907, Berjonneau dió a conocer un sistema de transmisión de imágenes fotográficas a distancia; que excluye el empleo del selenio. Consiste en preparar primero una prueba de similigrabado, sacada en una delgada lámina de cobre y arrollada en un cilindro análogo al del aparato Bakewell. A la llegada, las corrientes transmitidas cuando el estilo apoya sobre una parte negra de la imagen, accionan un refuerzo muy sensible, que determina el juego de un obturador especial. Este deja pasar más o menos la luz de una lámpara intensa que va a impresionar un papel sensible enrollado en un cilindro, animado con un movimiento sincrónico de el del cilindro transmisor. Cada impresión dura todo el tiempo que el estilo transmisor pasa por una parte negra de la prueba, y cesa cuando pasa por parte blanca.

TELEGRAFIA SUBMARINA

1025. Anomalías de la transmisión en las líneas submarinas. — La mayor parte de los aparatos usados en la explotación telegráfica de las grandes líneas submarinas, son

* La propiedad del selenio se aprovecha en los aparatos llamados impropiaemente *pilas de selenio*. Estos aparatos, perfeccionados sucesivamente por Sheford, Bidwell, Gillay y

Morse ordinarios o sistemas que usan el Código de señales de ese inventor. — Los *transmisores* de estas señales son idénticos en principio a los que se usan en el servicio de las transmisiones por las líneas aéreas : pero los *receptores* deben reunir condiciones especiales.

Hay que prever dificultades serias en las transmisiones eléctricas cuando se usan conductores preparados como los cables submarinos, cuya capacidad es enorme, cuando su resistencia es ya grande.

He aquí efectivamente lo que se observa en la extremidad de un cable que une Irlanda con América y que tiene 3 500 kilómetros de largo, cuando la otra extremidad es puesta en comunicación con un manantial eléctrico : durante 2/10 de segundo, nada ; después, una corriente excesivamente débil, apenas perceptible, cuya intensidad crece progresivamente, al principio con rapidez, luego con mayor lentitud, hasta hacerse uniforme al cabo de unos 3 segundos.

Cuando se interrumpe la comunicación del cable con el manantial eléctrico, la intensidad de la corriente recibida decrece progresivamente y según la misma ley.

Estas observaciones se han hecho por medio del *galvanómetro de espejo*, inventado por lord Kelvin y cuyas principales disposiciones hemos indicado antes. Este fué el primer receptor de la telegrafía submarina. Las corrientes lanzadas alternativamente en sentidos contrarios en la estación de salida obraban sobre el galvanómetro ; los movimientos

más o menos rápidos y los cambios sucesivos del *spot* (señal) los interpretaba el empleado de la estación de llegada, que de este modo distinguía los signos del código de Morse.

1026. *Sifón-recorder de Thomson* (lord Kelvin). — A más del cansancio que el aparato de espejo impone a los empleados, presenta los inconvenientes de los de señales fugitivas, así es que se consideró como un progreso importante el invento de Sir W. Thomson (lord Kelvin) del *sifón-recorder* (registrador), que permite apuntar en una tira de papel las desviaciones del órgano móvil del aparato receptor, según podría hacerse con un aparato fotográfico, pero en condiciones mucho más prácticas.

El sifón-recorder comprende dos partes distintas que deben examinarse separadamente. — La primera es el *sistema electromotor* y la segunda el *sistema registrador*.

1º *Sistema electromotor*. — Un carrete ligero (fig. 1011, I, II, III), de forma rectangular *pp* formado de gran número de vueltas de alambre fino, cuyos extremos terminan respectivamente en *e* y *s*, se suspende y mantiene con hilos de capullo *Hf* entre las ramas de un poderoso imán *NS*, a escasa distancia de las piezas polares. Un trozo de hierro *X* fijo

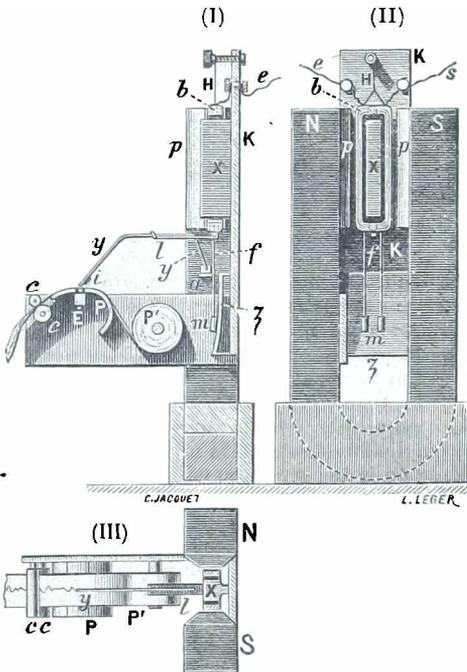


Fig. 1011.

en la platina de cobre *K*, a igual distancia de estas dos piezas, tiene por objeto acortar las líneas de fuerza magnéticas, concentrándolas en los dos espacios donde deben moverse los dos lados largos del carrete. Los hilos de capullo *f*, atados en la parte inferior de aquél, se mantienen tensos hacia abajo mediante pequeñas masas pesadas *m*, que el simple apoyo contra una pared *z* algo inclinada basta a inmovilizar. Entre estos dos hilos de tracción, el carrete mantiene una especie de índice formado por una

Ruhmer, se fabrican arrollando dos alambres de cobre o de platino, separados uno de otro, en un cilindro de materia aisladora, untado con selenio amorfo, insensible a la luz. Se somete el conjunto a una temperatura de 200° y se mantiene en ella durante cinco horas después de cristalizar el selenio. Ruhmer coloca el elemento en una ampolla vacía preparada como una lámpara de incandescencia.

pequeña lámina de aluminio l , destinada a revelar todos los movimientos que le impriman en torno de su eje vertical las corrientes que lo atraviesan.

2º *Sistema registrador.* — Ahora se trata de registrar los movimientos ejecutados por el índice l . La disposición representada permite ver un tubo capilar de vidrio yy , adherido con cera al índice l , encurvado hacia sus extremos de modo que le sea posible penetrar por uno de estos, y , en un pequeño vaso a que contiene tinta muy fluida, y rozar por el otro con la superficie de una tira de papel mantenida tensa por el soporte tambor PP'.

Una vez lleno el tubo de tinta por primera vez, mediante la aspiración efectuada en su extremo y , constituye un *sifón* que llevará toda la tinta del vaso a hasta la extremidad que se encuentra en contacto con el papel, siempre que éste se mueva, pues la capilaridad del tubo se opondría a una salida continua.

En la estación de salida se producen los signos poniendo alternativamente el cable en comunicación con el polo positivo y el negativo de una pila, estando el otro polo en comunicación con el suelo. En la estación de llegada, uno de los extremos del alambre del carrete comunica con el cable, y el otro con el suelo. Sin embargo, para sustraer el cable de la acción de las corrientes telúricas, que a veces son muy intensas, estas comunicaciones se establecen por medio de condensadores.

Una vez bien comprendido esto, es fácil concebir que las oscilaciones del carrete, amplificadas por el tubo sifón, tendrán como resultado trazar sobre la banda de papel

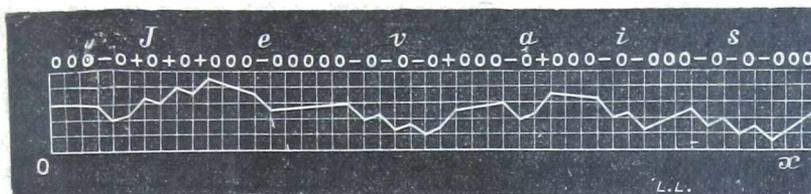


Fig. 1012.

arrastrada con velocidad uniforme por los cilindros cc sobre el tambor P, una sinusoide análoga a la de la figura 1012.

Aléjase algo el papel de la extremidad libre del tubo filiforme lleno de tinta, y se imprime a este un movimiento vibratorio continuo en un plano vertical. El menisco formado por la tinta en este extremo va a ponerse de este modo, en cada oscilación, en contacto con la hoja de papel, la cual, por efecto de su marcha, recibe una señal de puntos.

La vibración del tubo se mantiene en este sistema por un método muy sencillo. Un pequeño pedazo de alambre de hierro i está pegado a lo largo y por debajo de la parte inferior del tubo; ese alambre experimenta la influencia del magnetismo desarrollado por medio de una corriente intermitente en un pequeñísimo electroimán E.

OBSERVACIONES. — 1º El género de aparatos más usado actualmente en los cables largos es el sifón-recorder; pero como sus señales son bastante difíciles de interpretar, no se le usa sino en las líneas que no se podrían explotar por medio del aparato Morse ordinario. En efecto, en las líneas que no pasan de 500 kilómetros lo que se utiliza es el Morse ordinario.

2º La velocidad media de la transmisión por cables muy largos no es sino de doce a quince palabras por minuto.

TELEGRAFIA SIN HILOS

1027. **Aplicaciones de las ondas hertzianas a la telegrafía.** — **Radioconductores o cohesores.** — Después del descubrimiento de Hertz, se ha pensado si no podrían aplicarse las ondas electromagnéticas a la transmisión de los signos telegráficos. Esta idea no se ha podido llevar a cabo hasta el descubrimiento de los aparatos sensibles que permiten apreciar pequeñas ondas electromagnéticas. Los primeros aparatos de esta clase han sido los *radioconductores* o *cohesores*, inventados por Branly.

Radioconductores de Eduardo Branly. -- Unos polvos metálicos colocados en un tubo aislador y ligeramente comprimidos (fig. 1013) o bien pilas de discos o bolas metálicas, oponen gran resistencia al paso de la corriente. Pero si se consigue hacer pasar un momento una corriente, por medio de una pila de gran fuerza electromotriz, por ejemplo, o por un fenómeno de inducción, se vuelven conductores. Esta conductibilidad desaparece, a veces, rápidamente, o bien dura mucho tiempo;

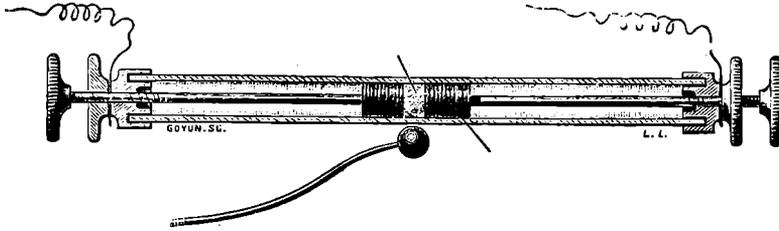


Fig. 1013.

un choque en el tubo que contiene el conductor discontinuo o en el zócalo del aparato, basta para suprimir la conductibilidad. El mismo efecto produce una elevación de temperatura.

Las ondas de Hertz, que provocan efectos intensos de inducción, producen, a distancia, la conductibilidad. Branly llama a estos aparatos *radioconductores*. Más a menudo, se los designa, impropiaemente, por el nombre de *cohesores* que les ha dado Lodge.

Para hacer ver el fenómeno de Branly, puede colocarse un tubo radioconductor en un circuito que contiene una pequeña pila y un galvanómetro. Si, a distancia, se produce una chispa oscilante, mediante una máquina estática o con un oscilador de Hertz, el galvanómetro, que sólo indicaba una corriente muy pequeña, desvíase inmediatamente. Un choque en el radioconductor conduce el galvanómetro a cero.

En cuanto a la explicación del fenómeno, no se ha encontrado aún.

La sensibilidad del cohesor depende poco de la distancia de los electrodos. Parece, pues, que los contactos sensibles sean los que existen entre el polvo y los electrodos. También se puede, lo cual es ventajoso desde el punto de vista de la regularidad del funcionamiento, no realizar sino un contacto sensible, constituyendo uno de los electrodos de un metal de la misma naturaleza que la limadura.

La presión de la limadura en los electrodos tiene gran importancia, así como la finura de los granos. El cohesor es tanto más sensible cuanto más finos son los granos; pero, de todos modos, no conviene emplear un polvo; pues en este caso se obtienen resultados irregulares.

Los mejores resultados se obtienen cuando uno de los dos metales que constituyen uno el polvo y otro los electrodos, es algo oxidable e inoxidable el otro. Para evitar una oxidación demasiado profunda, conviene practicar el vacío en el tubo, o simplemente cerrarlo, des-

pués de haberlo llenado de aire seco. Marconi emplea cohesores con limadura de níquel y con electrodos de maillechort. Los cohesores más sensibles son los de limaduras de oro o de plata, puros o mezclados con cobre, con electrodos de maillechort.

1028. **Aplicación del cohesor a la telegrafía sin hilos o radiotelegrafía.** — El cohesor fué el primer aparato sensible a las ondas electromagnéticas (o *detector de ondas*) empleado en la telegrafía sin hilos. Esta aplicación la realizó Marconi en 1896. Actualmente está casi abandonado su empleo, y ha sido reemplazado por otros detectores más sensibles y seguros. Esto no obstante, por razón de su interés histórico, describiremos el principio del aparato de cohesor, que desde el principio de la telegrafía sin hilos permitió corresponderse a muchos cientos de kilómetros.

1º *Estación transmisora.* — Esta comprende un carrete de inducción B (fig. 1014) que recibe la corriente primaria de una batería de acumuladores P por medio de un manipulador M, análogo al del telégrafo Morse. La secundaria del carrete está ligada a las bolas de un excitador E, entre las cuales salta un flujo de chispas oscilantes todo el tiempo que se apoya sobre M.

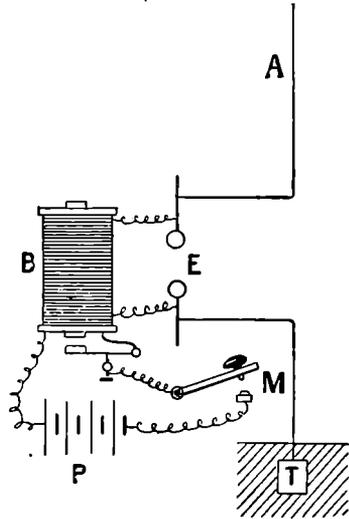


Fig. 1014.

Para transmitir lejos las ondas electromagnéticas así producidas, hay que poner una de las bolas del excitador en comunicación con el suelo, y la otra con una *antena A*, que es un alambre metálico colgado por un soporte aislador de un mástil más o menos alto. La altura de la antena de transmisión influye considerablemente en el alcance de las ondas; así una estación que puede transmitir a 100 km. con una antena de 30 m. de alto; tiene su radio de acción que llega a 800 km. con una antena de 300 m. (sostenida por un globo o por una cometa por ejemplo).

La antena emite un tren de una docena de ondas amortiguadas por cada chispa. Si se apoya poco tiempo sobre el manipulador, se producirá una emisión de algunos trenes de onda que corresponderá al punto del código de Morse; si se apoya más tiempo, se obtendrá mayor número de trenes de onda, que corresponderá al trazo o raya de dicho código.

2º *Estación receptora.* — Ésta comprende primeramente un cohesor C (fig. 1015) uno de cuyos electrodos comunica con el suelo y el otro con la antena de recepción A. El cohesor está intercalado en el circuito de una débil pila p y de un refuerzo sensible R. Este, al ser atravesado por una corriente, cierra el circuito de una fuerte pila P, atacando el receptor Morse M y el electroimán F de un martillo que da golpes en el tubo del cohesor.

3º *Funcionamiento.* — Supongamos que se apoya sobre el manipulador.

Cada chispa produce un tren de ondas que vuelve conductor al cohesor; la corriente pasa por el refuerzo, que cierra el circuito de P; el electroimán de Morse atrae a su armadura, pero la corriente cesa en seguida, porque el martillo destruye la conductibilidad del cohesor. Si el receptor

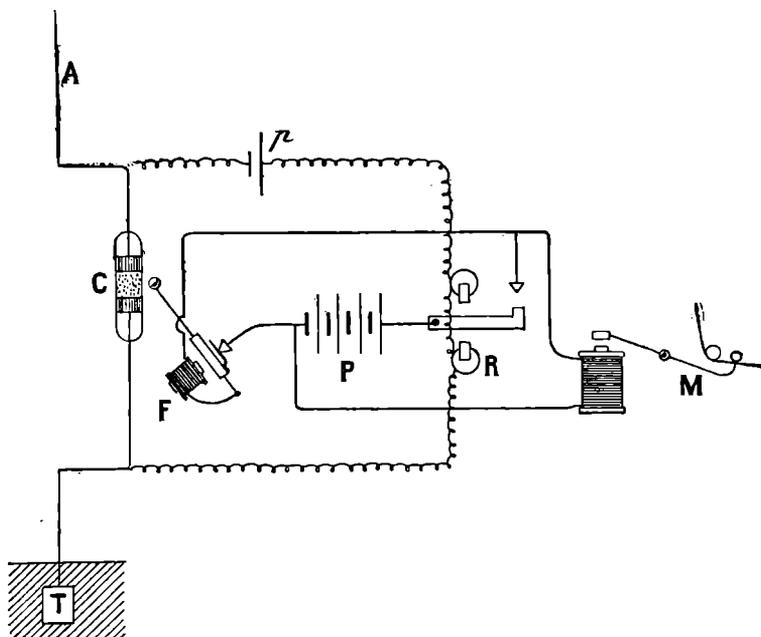


Fig. 1015.

no tuviera ninguna inercia, marcaría una serie de puntos aproximados durante el tiempo que se apoya sobre el manipulador. Pero a causa de la inercia del receptor, éste marca un trazo continuo.

Si se hacen con el manipulador las emisiones breves o largas, que corresponden a los puntos y a los trazos del código de Morse, el receptor marcará trazos cortos o largos a semejanza de los puntos y trazos del código.

Para una transmisión doble, cada antena sirve sucesivamente para la emisión y la recepción.

1029. Perfeccionamientos de los aparatos primitivos. — 1º *Generadores de las oscilaciones.* — Los aparatos productores de las corrientes oscilatorias eran al principio carretes de inducción cada vez más potentes, después *transformadores* industriales, que utilizan una potencia considerable (100 caballos para la estación de la torre Eiffel, que dan una diferencia de potenciales de 100 000 voltios). Los *manipuladores* han sido modificados con la mira de cortar corrientes intensas; la ruptura se produce en aceite, y se coloca en derivación, en los bornes del manipulador, un condensador que atenúa la chispa de self-inducción.

El simple oscilador de Hertz ha sido reemplazado por aparatos de mayor capacidad, comprendiendo *condensadores*. Estos son, bien botellas de Leiden, bien condensadores de platinos, o también condensadores cilíndricos, formados de tubos de vidrio, en cuyo interior y exterior se pegan hojas de papel de estaño (condensador de Moscicki). En la torre Eiffel hay 896 de estos tubos de 6 centímetros de diámetro y 1 metro de largo.

El excitador está dispuesto a propósito para renovar las superficies entre las cuales salta la chispa; por ejemplo, en la torre Eiffel está formado de dos cilindros de cinc de

ejes paralelos, girando en sentidos inversos. De este modo se reduce el desgaste y se evita a la vez la formación de los arcos.

2º *Antenas.* — Se forma la antena con gran número de alambres diversamente dispuestos, para cubrir la mayor superficie posible. La antena de la torre Eiffel, que reúne las ventajas de una altura incomparable y de ancha superficie, se compone de 6 cables de 5 mm. de diámetro, desplegándose en forma de abanico desde la tercera plataforma de la torre. Estos alambres están aislados de su soporte superior común por una serie de campanas de porcelana, y están ligados por otros aisladores a obenques que los prolongan y que están atados a soportes bien amarrados en el suelo. A unos cincuenta metros del suelo, parten alambres de cada cable y, reuniéndose en uno solo, penetran en la estación instalada en locales subterráneos. La comunicación con el suelo se efectúa por medio de láminas de cinc con una superficie total de 600 m².

Longitud de las ondas emitidas. — La longitud de las ondas depende de las dimensiones de la antena y aumenta con ellas*. La estación de la torre Eiffel emite ondas de 2000 metros; las estaciones de Clifden (Irlanda) y de Glace-Bay (Canadá), instaladas por Marconi para corresponderse entre sí por encima del Atlántico, tienen una longitud de onda de 4000 metros. Por el contrario, las estaciones costeras ordinarias dan, generalmente, ondas de 600 metros.

1030 *Emisión indirecta.* — El defecto del sistema de emisión que hemos descrito (1028) consiste en que da ondas muy amortiguadas por causa de la gran resistencia de la chispa. Se ha hecho un progreso considerable empleando la emisión indirecta que se efectúa de dos maneras.

1º *Emisión por inducción.* — El circuito antena-tierra comprende la corriente secundaria de un transformador Tesla, mientras la primaria forma parte del circuito del exci-

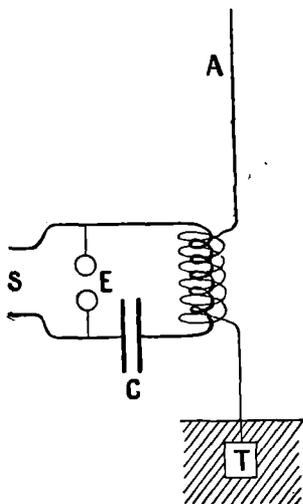


Fig. 1016.

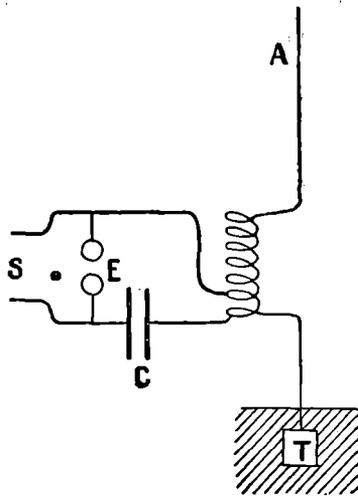


Fig. 1017.

tador E (fig. 1016). Este último circuito comprende también un condensador C. Los bornes del manantial eléctrico S (carrete de inducción o transformador) están unidos sea a los bornes del excitador (fig. 1016), sea a las armaduras del condensador. Para

*. La longitud de onda se mide con los *ondímetros*, cuyo principio se debe a Janet. Se componen de un circuito que comprende una self-inducción, un condensador de capacidad variable y un indicador de corriente. El ondímetro experimenta, por inducción, la acción del aparato que produce las ondas; se hace variar la capacidad hasta que, por causa de un fenómeno de resonancia, la corriente inducida sea máxima: el período T de las oscilaciones es entonces igual al período propio del circuito que se puede calcular según su capacidad y su self-inducción. De aquí se deduce la longitud de onda por la fórmula $\lambda = VT$. En el modelo sumamente práctico de Tissot, el condensador está formado de dos láminas en forma de cuadrado o de losanje que se recubren parcialmente; una de ellas se mueve paralelamente a una diagonal; la variación de la resistencia es entonces proporcional al cuadrado del movimiento.

obtener los efectos más intensos, es necesario que los períodos de ambos circuitos estén acordes; para esto se modifica la capacidad o la self-inducción del circuito del excitador; en otros casos se añade al circuito antena-tierra un condensador y un self arreglables.

2º *Emisión por derivación.* — Ésta consiste en emplear un resonador *Oudin*. El circuito antena-tierra (fig. 1017) comprende un solenoide (en la torre Eiffel donde se emplea este sistema, el solenoide es un tubo de cobre rojo enrollado en un serpentín de 6 espiras). En el circuito del excitador se intercala una parte solamente de este solenoide. El arreglo de concordancia se hace como en el caso precedente.

1031. **Nuevos detectores.** — Hoy se reemplaza el cohesor por otros detectores, de los cuales los principales son los siguientes.

1º *Detector electrolítico.* — Éste fué inventado por el comandante Ferrié. He aquí la forma que se le da actualmente. Es un vaso electrolítico *V* (fig. 1018) que contiene agua acidulada con el ácido sulfúrico. En este vaso penetra un alambre de platino *c* de cualquier diámetro y una punta muy fina *a* también de platino, soldada a un tubo de vidrio y puesta en comunicación con el exterior por medio de un alambre más grueso. Con un potenciómetro se establece entre *a* y *c* una diferencia de potenciales algo menor que el valor crítico necesario para producir la electrólisis, estando *a* en el potencial más alto. En el mismo circuito se intercala un teléfono *T*; por otra parte se intercala *a* y *c* en el circuito receptor (antena-tierra, para la recepción directa). La llegada de ondas produce el efecto de disminuir la polarización de *a*. De ahí resulta una corriente en el circuito del teléfono. Por consiguiente, a cada recepción de ondas se oye un sonido. Luego el punto del código de Morse es traducido por un sonido breve y el trazo por uno largo. Dicese que la recepción se hace al sonido (como en el *sounder* de los telégrafos ordinarios).

La recepción al sonido disminuye los inconvenientes que presentan las descargas eléc-

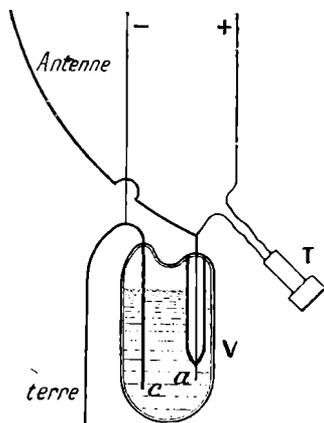


Fig. 1018.

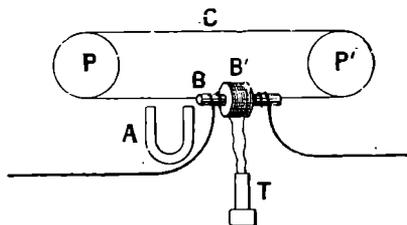


Fig. 1019.

tricas de los nublados; porque, produciendo ondas electromagnéticas, impresionan los receptores, y entonces se oyen ruidos confusos en el teléfono; pero el oído experimentado del telegrafista los distingue claramente de los que producen las ondas verdaderas; por el contrario, los nublados trastornan por completo la inscripción del receptor Morse.

2º *Detector magnético.* — Marconi emplea un detector fundado en una propiedad de las ondas hertzianas descubierta por Rutherford y que

consiste en una modificación que producen éstas en las propiedades magnéticas del acero.

El aparato de Marconi está formado por una especie de cuerda sin fin C (fig. 1019) fabricada con alambres de hierro muy finos. Está armada sobre dos poleas PP' de las cuales una está movida por un movimiento de relojería, de modo que la cuerda es arrastrada por una velocidad de 5 a 10 centímetros por segundo. En su movimiento, los diversos puntos de la cuerda pasan por el campo de un imán A; luego, a una especie de pequeño transformador BB'. La primaria está formada por un carrete B de tres a cuatro centímetros de longitud, con una sola capa de alambre, enrollada en un tubo de vidrio o de ebonita e intercalada en el circuito del receptor. Las ondas determinan corrientes de alta frecuencia en este carrete. Encima hay otro carrete B' ligado al teléfono T. Cuando llegan las ondas, las variaciones del magnetismo del núcleo producen corrientes inducidas en el carrete B', y se oye un sonido en el teléfono.

3º *Detectores de contactos sólidos o de cristales.* — Éstos, descubiertos recientemente, se emplean cada vez más por razón de su gran simplicidad; pues, en efecto, funcionan sin que intervenga un manantial auxiliar de corriente. Su principio se funda en el hecho siguiente descubierto por Pickard en 1907.

Si se intercala en el circuito de un teléfono un cristal conductor a propósito, sobre el cual apoya una punta metálica fina; cada llegada de ondas electromagnéticas se traduce por un sonido en el teléfono. Hasta ahora no se conoce la causa de este fenómeno.

Tissot divide los detectores sólidos en dos categorías. En unos, intervienen fenómenos termoeléctricos, producidos por el calentamiento del punto de contacto bajo la influencia de las corrientes de alta frecuencia, y ellos producen a su vez la fuerza electromotriz que determina una corriente en el teléfono.

En los otros, sería simplemente un efecto de válvula; al pasar la corriente en un sentido mejor que en otro, el teléfono, en vez de recibir corrientes de alta frecuencia, a las que es insensible, recibe una corriente que domina en un sentido, resultando así un sonido.

Sea de ello lo que fuere, la pirita de hierro parece el mejor cuerpo para este empleo. En el detector de pirita (fig. 1020) el cristal está engarzado en una cápsula de plomo C. Una punta metálica fina apoya sobre el cristal con una fuerza que se puede modificar moviendo un contrapeso A a lo largo de la palanca que sostiene la punta. Además, como todos los puntos del cristal no son igualmente sensibles, se puede mover la cápsula C por dos tornillos horizontales perpendiculares entre sí, para efectuar el contacto en el punto deseado.

El detector de pirita es casi tan sensible como los precedentes, y

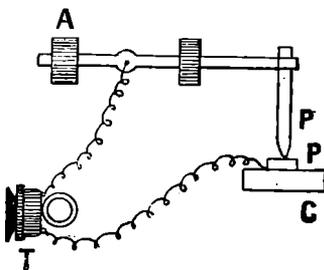


Fig. 1020.

resiste mejor que el electrolítico al efecto de las descargas atmosféricas. Por desgracia, al menor choque se desarregla.

1032. **Recepción indirecta.** — **Sintonismo.** — **Ondas musicales.** — **Ondas dirigidas.** — Ya no se arma directamente el detector en el circuito antena-tierra; pero se le excita, sea por *inducción* (fig. 1021), sea por *derivación* (fig. 1022) siendo las disposiciones análogas a las que se emplean para la transmisión.

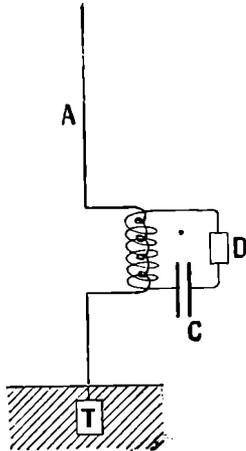


Fig. 1021.

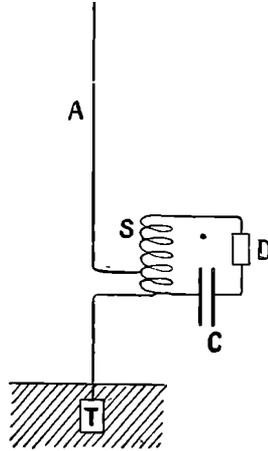


Fig. 1022.

En la recepción por inducción, el circuito antena-tierra comprende la primaria de un pequeño transformador, y la secundaria forma parte de un circuito que comprende el detector D.

En la recepción por derivación, el circuito del detector comprende un solenoide S, algunas de cuyas espiras forman igualmente parte del circuito antena-tierra.

En ambos casos, deben estar acordes los dos circuitos, el del detector y el de la antena-tierra: esto se consigue modificando la capacidad del circuito del detector por un condensador C o la self-inducción, para un carrete arreglable.

En ambos casos, deben estar acordes los dos circuitos, el del detector y el de la antena-tierra: esto se consigue modificando la capacidad del circuito del detector por un condensador C o la self-inducción, para un carrete arreglable.

Se necesita además, para que se puedan percibir las débiles ondas que provengan de un transmisor lejano, que los periodos de las dos antenas (transmisora y receptora) sean iguales. Ya hemos visto que, añadiendo en el circuito antena-tierra un condensador y una self-inducción arreglables, se puede modificar el periodo. Así se realizará con frecuencia la concordancia llamada *sintonismo*.

El sintonismo es importante desde otro punto de vista, porque permite a dos estaciones corresponderse entre sí, sin ser molestadas por las ondas emitidas por otras estaciones, si no tienen el mismo periodo que las de las primeras. El sintonismo sólo se ha conseguido cuando se han utilizado las ondas poco amortiguadas de la transmisión indirecta. Con las ondas amortiguadas de la transmisión directa, cualquier receptor podía registrar ondas de cualquier periodo.

Hay que tener en cuenta, sin embargo, que el sintonismo no logrará asegurar el secreto de las comunicaciones. En efecto, siempre será posible acordar cualquier receptor con ondas de cualquier periodo que cubren todo el espacio en el radio de acción del transmisor. De modo que, cualquiera estación puede recibir los despachos de la torre Eiffel tan bien como las que provengan de una estación costera, pero no al mismo tiempo.

Emisiones musicales. — El sintonismo puede también realizarse por los nuevos sistemas de transmisión, llamados de emisiones musicales. Consiste en producir gran número de chispas por segundo (de 400 a 2000). Los ruidos próximos que se producen en el teléfono receptor, dan entonces la impresión de un sonido musical.

Como se puede acordar la placa del teléfono con un sonido dado, con algunas vibraciones de diferencia por segundo, se comprende que dos estaciones acordes acústicamente pueden corresponderse entre sí sin ser molestadas por ondas de periodos musicales diferentes. Las chispas musicales tienen también la gran ventaja de permitir la distinción perfecta de los signos recibidos, de los ruidos incoherentes producidos por las descargas atmosféricas. Estas han hecho práctica la telegrafía sin alambres en Africa, donde, antes de ser empleadas, los nublados embrollaban continuamente las comunicaciones.

La producción de las chispas musicales se hace de diversos modos. Marconi se sirve de un excitador giratorio que produce un gran número de chispas por segundo; la sociedad Telefunken emplea alternadores de gran frecuencia (de 800 a 2000). En Francia, sobre todo en la torre Eiffel, se prefiere el *alternador de resonancia*, dispuesto para aumentar la intensidad de la armonía que presenta la frecuencia conveniente. Este

último sistema tiene la ventaja de emplear alternadores del tipo industrial ordinario.

Ondas dirigidas. — Desde el principio de la telegrafía sin alambres se ha buscado el medio de dirigir las ondas de una estación a otra para poder corresponderse sin ser molestadas por otras estaciones. Hasta ahora no ha quedado bien resuelto este problema. Hay que observar ante todo que el problema de una antena recta en el eje focal de un espejo parabólico, cosa que naturalmente viene a la idea, es impracticable por causa de la difracción. Siendo muy grande la longitud de onda, el espejo debería tener dimensiones enormes.

De los procedimientos que han dado algunos resultados, el más sencillo consiste en el empleo de *antenas horizontales*, porque transmiten y reciben mejor en su misma dirección; pero hasta ahora no se ha hecho ninguna aplicación en grande.

1033. *Alcance de las estaciones de telegrafía sin alambres.* — *Aplicaciones diversas.* — El alcance de las ondas que emite una estación depende evidentemente, no sólo de la altura y de la superficie de la antena, sino también de la potencia de los aparatos de transmisión. Se distinguen las estaciones potentes, tales como la torre Eiffel (potencia 100 caballos) y las costeras (potencia 10 caballos a lo sumo) diseminadas por las costas; el alcance de éstas apenas llega a 2000 km., mientras que la de la torre Eiffel pasa de 5 000 km.

Un hecho que llama la atención es que el alcance es mucho más grande durante la noche que durante el día (por ejemplo 2000 km., por la noche, 700 km., por el día). Esto no se ha explicado aún de una manera cierta. Se supone que se debe a la ionización del aire por los rayos ultravioletados del sol; no propagándose las ondas en los medios conductores, se comprende que la conductibilidad parcial tomada por el aire ionizado disminuye el alcance de las ondas.

Ni la bruma ni las nubes detienen las ondas; y traspasan las montañas interpuestas entre las antenas de emisión y de recepción. Este último fenómeno proviene de la difracción de las ondas. A esta difracción se debe el que la redondez de la tierra no estorbe las comunicaciones a varios miles de kilómetros.

Aplicaciones. — 1º *Comunicaciones a través de los mares.* — La telegrafía sin hilos es de uso corriente para la correspondencia de los buques unos con otros o con la tierra firme. Ella presta grandísimos servicios para señalar los siniestros marítimos y las tempestades. Además, se puede prever que los cables submarinos, que son excesivamente costosos, sean reemplazados por la telegrafía sin alambres; actualmente las estaciones Marconi corresponden por encima del Atlántico.

2º *Aplicaciones militares.* — En este caso se emplea un mástil que se desarma o una cometa para sostener la antena. Se han construido aparatos de telegrafía sin alambres que pueden utilizarse a bordo de los globos dirigibles y de los aeroplanos, y en este caso la antena es un alambre que pende libremente en el aire.

3º *Transmisión de la hora y medida de las longitudes.* — Sabida es la importancia que tiene el conocimiento de la hora de un meridiano origen, para la determinación del punto en el mar, la cual permite determinar la longitud del lugar en que el navegante se encuentra. Hasta estos últimos tiempos, los navegantes necesitaban llevar consigo cronómetros arreglados conforme a la hora del meridiano origen. Pero no siendo su marcha perfectamente regular, resultaban errores de gravedad. Pero ahora, las estaciones potentes de radiotelegrafía envían varias veces al día signos horarios que pueden percibir todos los buques provistos de aparatos receptores.

Por otra parte, Forrié, Claudé y Driencourt han establecido un método que permite medir, de manera exacta, la diferencia de las longitudes de dos estaciones fijas, mediante transmisiones por ondas electromagnéticas.

4º *Radiotelegramas meteorológicos.* — Como la mayor parte de las depresiones barométricas que llegan a Europa, tienen su origen en el Atlántico, importa mucho que sean comunicadas a tiempo a las Oficinas meteorológicas. Tal es el servicio que presta ahora cierto número de buques por medio de la radiotelegrafía.

CAPÍTULO IV

TELEFONÍA

1034. **Definiciones y clasificación.** — Llámase *telefonía* el conjunto de procedimientos empleados para transmitir la palabra a distancia.

Todo aparato telefónico comprende dos órganos esenciales, colocados, uno **en la** estación de salida y otro en la de llegada, y unidos entre sí por una línea de **alambre** simple, o, más generalmente, de dos alambres. El primer órgano se denomina *transmisor*, y *receptor*, el segundo. Aquél recibe la palabra de boca de la persona que habla, y el receptor la comunica al oído de la que escucha.

1035. **Teléfono Bell.** — El teléfono tipo es el primero que inventó, en 1876, el profesor Graham Bell, de Filadelfia.

I. *Descripción.* — La figura 1023 representa un corte longitudinal de este aparato. La envoltura exterior es un estuche de madera, M,

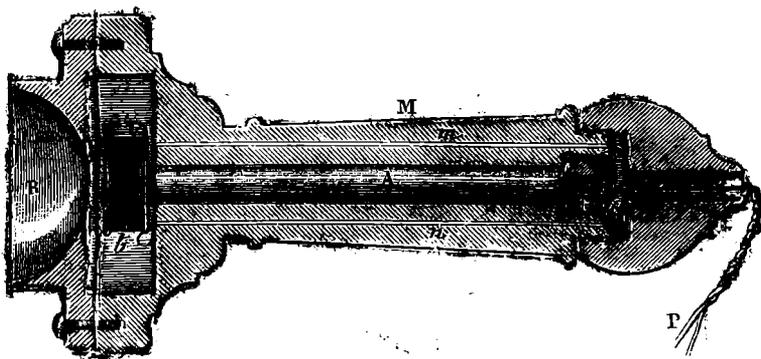


Fig. 1023.

que termina en un extremo por una cajita de la misma sustancia, provista de una embocadura B. En la caja hay un carrete *b* formado por un núcleo de hierro dulce en el cual se enrolla gran número de veces un alambre de cobre recubierto de seda. Los dos extremos de éste se unen a otros dos alambres, también de cobre, más gruesos, *m* y *n*, cubiertos de seda y gutapercha, y que salen torcidos uno contra otro por la otra punta P. Entre la embocadura y el carrete hay una placa de hierro dulce *o*, muy delgada, muy flexible y muy próxima al núcleo del carrete; pero no lo bastante para ponerse en contacto con él, cuando aquél vibra. Finalmente, en la otra cara del carrete existe una barra imantada A, la cual imanta por influencia al núcleo del carrete.

Este órgano se toma como *transmisor*, empleando por *receptor* otro aparato idéntico: uno de los correspondientes aplica la boca contra la embocadura del primero, y el otro, el oído contra la del segundo. Los

carretes de ambos aparatos están unidos entre sí por los dos alambres P.

II. *Funcionamiento y teoría.* — Cuando se habla en alta voz en la embocadura, transmitense a la placa de hierro dulce las ondulaciones del aire; esta placa vibra al unísono con la voz y, siguiendo la amplitud de sus vibraciones, se aproxima más o menos al núcleo del carrete. De ahí resultan en el carrete variaciones del flujo de inducción, que producen corrientes en el alambre del carrete. Estas corrientes inducidas propáganse por el circuito cerrado que va del transmisor al receptor. Pasan al carrete del receptor produciendo en él variaciones de magnetismo alternas, y estas variaciones de magnetismo provocan, a su vez, en la placa de hierro dulce del receptor, oscilaciones semejantes a las del transmisor; la segunda placa empieza a vibrar al unísono con la primera; transmitense al aire sus vibraciones; y, si se aplica el oído contra la embocadura, se perciben los sonidos emitidos en la embocadura del transmisor.

Estos sonidos serán más o menos amortiguados, a causa de una pérdida de energía más o menos grande en la transmisión y transformación del movimiento vibratorio.

III. *Objeciones a la teoría elemental.* — Numerosas objeciones se han hecho a la teoría elemental que, en un principio, fué admitida a causa de su sencillez.

Mercadier ha demostrado que se podía reemplazar, en un teléfono, la placa de hierro, por limaduras de hierro dispuestas en una hoja de cartón: no cabe hablar aquí de las vibraciones de conjunto de la placa. También ha construido teléfonos en que la placa de hierro estaba sustituida por otra de aluminio o de cobre, lo cual parece demostrar que la inducción magnética no es la única causa de producción de las corrientes.

Construyendo teléfonos cuya placa era incapaz de vibrar bajo la acción de la voz humana, es decir, que tenga un sonido fundamental superior a do° , Mercadier ha observado que aumentaba la calidad del efecto telefónico, es decir, que la voz se alteraba mucho menos de lo que se altera con los aparatos ordinarios. Finalmente, ha demostrado que el sonido transmitido no deja de ser perceptible, no solo cuando se suprime la placa vibrante, sino también cuando se quita el núcleo imantado; pero, siempre, con tal que no se hallen muy apretadas las espiras del alambre.

El fenómeno es mucho más complicado de lo que parece a primera vista, y los sonidos producidos deben atribuirse a causas múltiples:

1^a A las vibraciones moleculares que resultan en el núcleo y en la placa, por las imantaciones y desimantaciones sucesivas debidas a las corrientes inducidas del transmisor.

2^a A las vibraciones de conjunto de la placa o, si es delgada, a ambos lados de su posición de equilibrio (según Mercadier, estas vibraciones son perjudiciales para la calidad de los efectos, y útiles, para su intensidad).

3^a A las vibraciones moleculares producidas en el alambre del carrete por las variaciones de estas corrientes inducidas.

IV. *Sensibilidad del teléfono Bell.* — So puede formar idea de la extremada sensibilidad de este aparato, por la debilidad de la corriente que basta para impresionarlo. La intensidad de la corriente producida por el teléfono Bell, para una vibración sonora correspondiente a la normal, es igual a la de la corriente que originaría un solo elemento Daniell en un circuito telegráfico (alambre de hierro de 4 milímetros de diámetro) que diera 290 veces la vuelta a la Tierra.

V. *Aplicación de la sensibilidad telefónica.* — Esta grande sensibilidad del aparato se ha aplicado a revelar la existencia de corrientes sumamente débiles. Para esto, colócase un teléfono en el circuito por donde pasa la corriente débil; después, córtase el circuito en un punto cualquiera y se frota uno contra otro sus dos extremos: si pasa por él la menor corriente, oýense en el teléfono crujidos que corresponden a cada apertura o cierre del circuito. El teléfono puede servir también para apreciar el equilibrio del punto de Weststone (785).

1036. **Otros teléfonos.** — 1º *Teléfono Ader.* — El teléfono no se emplea ya como transmisor, sino solamente como receptor, el cual ha sido muy perfeccionado por Ader.

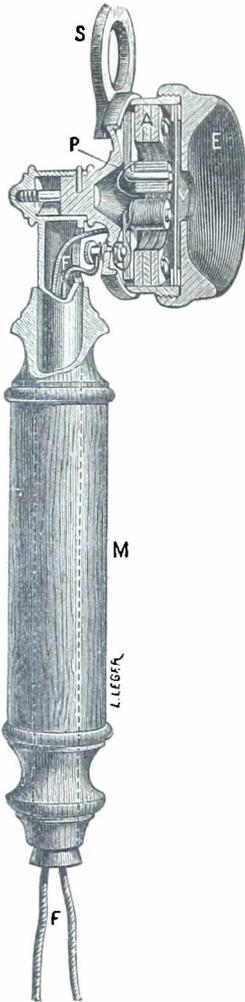


Fig. 1024.

En los modelos más recientes (fig. 1024), el imán tiene la forma de una corona A constituida por anillas de acero superpuestas. En él se han desarrollado dos polos magnéticos en los dos extremos de un diámetro. De estos puntos parten dos láminas de hierro dulce que se encorvan para formar los núcleos P de dos carretes que forman parte del circuito telefónico FF. Para que se añadan al circuito exterior los efectos de inducción producidos en el carrete, hace falta que los carretes estén arrollados en sentido contrario. Al otro lado de la lámina vibrante V hay una anilla de hierro dulce que sirve de armadura al imán. Se habla en una especie de embocadura de madera E, como en el teléfono Bell. El todo está sostenido por un mango M, atravesado por los alambres, y se le puede colgar por medio de un anillo S. A menudo, el anillo sirve de mango para tener el aparato. En los antiguos modelos Ader, el mismo imán servía para este uso, encorvándose hacia el exterior (fig. 1025).

Este teléfono funciona ordinariamente como receptor; pero también podría funcionar como transmisor, del mismo modo que el teléfono ordinario de Bell.

2º *Teléfono Dussaud.* — Dussaud inventó un teléfono muy poderoso, que habla en voz alta; no se necesita acercarse al aparato para emplearlo. Aprovechó los dos lados de la placa vibrante del receptor, añadiendo a cada uno una cajita de resonancia.

3º *Teléfono registrador Dussaud.* — Dussaud ha construido también un teléfono registrador, fijando su receptor en la membrana de un fonógrafo; al mismo tiempo, se escucha mediante derivaciones por tubos acústicos. La casi totalidad del sonido del receptor de voz alta llega a la placa del fonógrafo y permite la inscripción de palabras dichas en las dos estaciones,

en tanto que una pequeña derivación basta para dejarlas oír.

1037. **Micrófono (de Hughes).** — Si en un circuito recorrido por una corriente (fig. 1025), se coloca un teléfono y un cilindro de carbón, muy movable en sus contactos (también de carbón), se observa que las variaciones más ligeras impresas al carbón modifican bastante la resistencia de los puntos de contacto y, por consiguiente, la intensidad de la corriente, para producir efectos telefónicos.

Este aparato se realiza por dos carbones de retorta *n* y *o*, montados paralelamente en un mismo soporte y cada uno provisto de una cavidad en que se introduce un carbón *c* algo más grueso, de unos 4 centímetros de largo, y suficientemente libre para poder sufrir ligeras sacudidas.

Para eliminar las vibraciones exteriores, colócanse bajo la plancha horizontal del soporte, tubos de caucho o de algodón en rama. El sonido más débil producido en la plancha horizontal, aparta el carbón *c*, hace

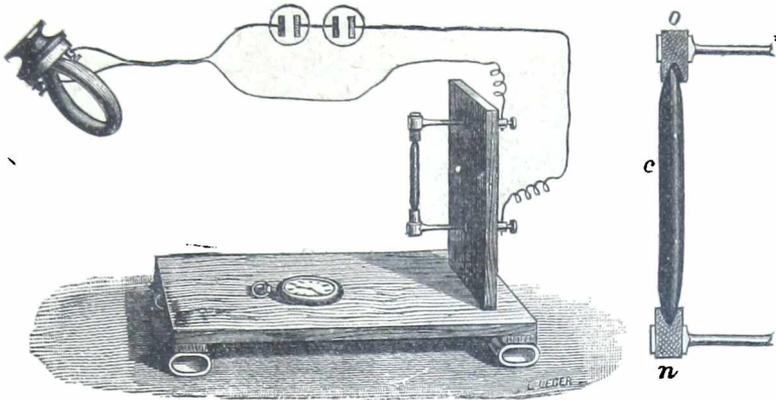


Fig. 1025.

variar la intensidad de la corriente y reproduce, en el teléfono, un sonido considerablemente reforzado : de ahí procede el nombre de *micrófono* dado a este aparato. De este modo, el tic-tac de un reloj, el andar de un insecto sobre la plancha, se perciben en el teléfono, a gran distancia. Actualmente, empléase como transmisor en la telefonía un micrófono perfeccionado.

1038. **Transmisores microfónicos.** — 1º *Transmisor Ader.* — El transmisor Ader es un *micrófono múltiple*, constituido por varios carbones colocados como una especie de doble parrilla (fig. 1026). Esto micrófono apenas se usa en la actualidad.

2º *Transmisor de membrana.* — En numerosos modelos de micrófonos se han suprimido las varillas de carbón para reemplazarlas por una o dos membranas de la misma sustancia, en contacto con granos de carbón.

Micrófono Bailleux. — La pieza principal es la membrana de carbón aglomerado *V* (fig. 1027); apóyase contra pequeños granos esféricos de la misma sustancia, lo cual realiza numerosos contactos microfónicos. Las vibraciones de la voz transmitense a la membrana por un pabellón de ebonita



Fig. 1026.

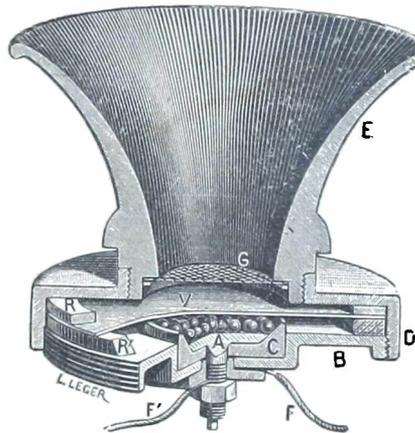


Fig. 1027.

E. Los alambres *F* y *F'* de la línea se encuentran, el primero en comunicación con la membrana, por mediación de las piezas metálicas *B*, *D*, *R*; el segundo, con las bolas, por la pieza *A*, aislada del resto del aparato por la cubeta de ebonita *C* y por un anillo de la misma sustancia situado debajo.

El arreglo de este aparato es muy sencillo. El rodete *R'* es de caucho y basta con

apretar más o menos B contra D para modificar la fuerza con que apoyan las bolitas contra la membrana.

Microfonos de limaduras. — En estos microfonos se amontonan granos de carbón entre dos pastillas de la misma substancia. Estos aparatos son los más sensibles. Por otra parte, suprimen completamente los crujidos que se producen en los antiguos microfonos de varillas.

1039. Teléfonos y microfonos combinados. — Ahora se emplean cada vez más aparatos en que van reunidos el teléfono y el microfono. *Tal e*

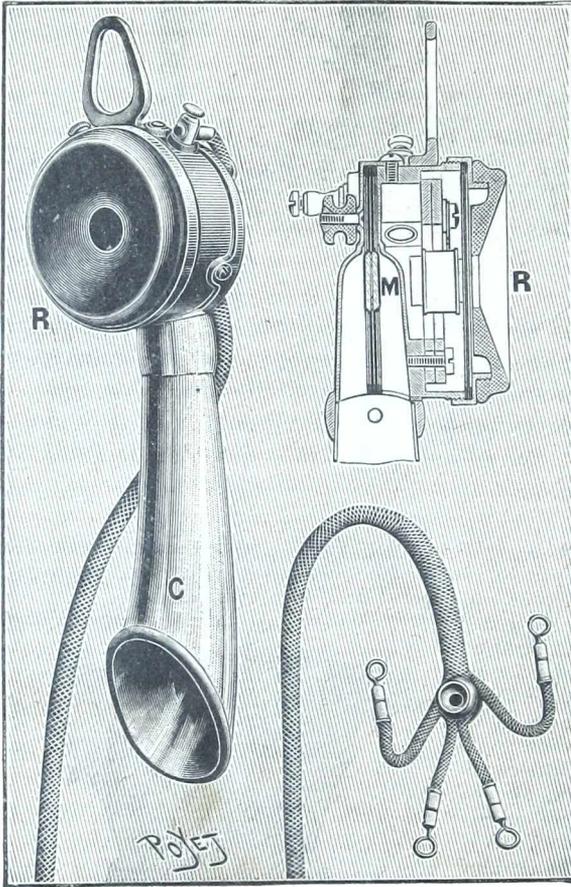


Fig. 1028.

el monófono (fig. 1028) Sólo tiene un receptor Ader R y un microfono de limaduras M de gran sensibilidad, al cual llega el sonido por una trompeta acústica C, que sirve a la vez de mango para tener el aparato. Cuando se aplica el receptor a la oreja, la boca no se encuentra en frente de la abertura de la trompeta C; pero la sensibilidad del microfono es tal que las ondas sonoras difractadas bastan para impresionar el oído. Esta disposición tiene la ventaja de evitar que caiga saliva en el aparato. Al monófono llegan cuatro hilos aislados, contenidos en un solo cordón y que ponen en comunicación al transmisor, por una parte, y al receptor, por otra, con los demás aparatos de la estación.

1040. Perfeccionamiento de Edison : empleo del carrete de inducción. — Cuando la línea es corta, la resistencia del microfono constituye la mayor parte de la resistencia del circuito, y toda variación en esta resistencia produce una variación de corriente bastante considerable. Pero, para largas distancias, como la resistencia del microfono no es sino una pequeña fracción de la resistencia total, sus variaciones sólo producen pequeñas variaciones de corriente, incapaces de accionar el receptor. Edison ha hecho dar un gran paso a la telefonía introduciendo en los microfonos el empleo del carrete de inducción.

El circuito microfónico comprende la pila P (fig. 1029), el micrófono M, y el circuito primario de un carrete de inducción B (cuya resistencia es siempre muy débil : 1 a 4 ohmios). El circuito secundario de este carrete (150 a 200 ohmios) comunica con la línea L y con los teléfonos receptores R.

Las variaciones de intensidad de la corriente primaria producen, en el circuito secundario, corrientes inducidas de notable tensión, que se propagan a través de la línea y van a los receptores.

La figura 1029 muestra esquemáticamente la disposición completa de

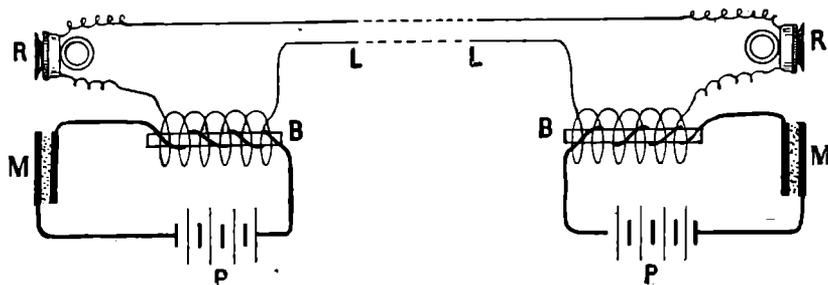


Fig. 1029.

dos estaciones que se corresponden directamente entre sí. Cada una tiene una pila, un micrófono y un carrete. Los circuitos secundarios están reunidos por la línea L y comprenden los receptores de ambas estaciones.

1041. **Líneas telefónicas.** — En las líneas telefónicas urbanas, cada abonado debe poder ser puesto en comunicación con otro abonado. Con este fin las líneas de los abonados están enlazadas con la oficina central (o con otras oficinas en el caso de que haya una red muy extensa, comunicando estas entre sí por cierto número de líneas). El abonado que quiere hablar con otro, pide la comunicación a la oficina, para que el empleado establezca la comunicación entre las dos líneas.

Las primeras estaciones de abonados se componían de un micrófono transmisor, de dos teléfonos receptores, de un timbre y de dos pilas : una para accionar el timbre del corresponsal ; la otra para la conversación. Primeramente se suprimió la primera pila para reemplazarla por una magneto pequeña que se maniobraba con un manubrio. Ahora, en las redes extensas, se han suprimido los generadores de corriente en la estación de los abonados, reemplazando dichos generadores por una *batería central* de acumuladores, colocada en la oficina. En cada estación de abonado, uno de los receptores está colgado de un gancho conmutador, móvil al rededor de un eje. Cuando se descuelga el receptor para llevarlo a la oreja, el gancho establece la comunicación de la estación del abonado con la oficina, y en ésta se enciende una lamparita, indicando que el abonado pide comunicación. El empleado escucha el número que se le pide, llama al corresponsal por medio de una corriente alterna y establece la comunicación entre las dos líneas.

La figura 1030 representa el esquema de una oficina de abonado,

donde se ve el funcionamiento del aparato. Cuando el gancho conmutador Cr está abajo, la oficina está en la posición de espera. Si el empleado de la oficina lanza una corriente alterna de llamada, ésta pasa a los

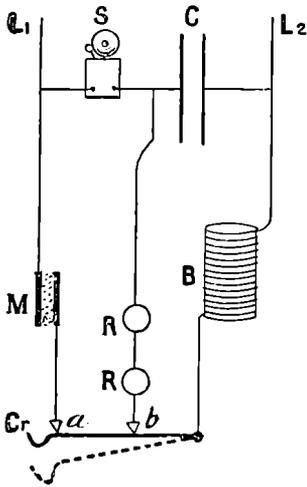


Fig. 1030.

dos alambres de línea $L_1 L_2$ y al timbre S por el condensador C , que no la detiene (mientras que no deja pasar las corrientes continuas). Cuando se descuelga el receptor, el gancho Cr se levanta por la acción de un muelle y se establece una comunicación entre a y b ; entonces la corriente continua de la batería central puede pasar por la línea $L_1 L_2$, el micrófono M y el carrete de self B (este detiene las corrientes alternas o variables); esta corriente sirve para encender la lamparita, cuando el abonado pide la comunicación, y, una vez obtenida ésta, sirve también para la conversación. Las corrientes recibidas durante la conversación, que son variables, no pueden franquear el carrete B ; pasan por el condensador C y los dos receptores RR .

Hay que añadir que están en estudio otros sistemas completamente automáticos, que permitirán al abonado obtener por sí mismo, sin necesidad de empleado, la comunicación con el número que desea.

1042. Telefonía sin alambres por ondas electromagnéticas o radio-telefonía. — Se ha intentado aplicar las ondas hertzianas a la transmisión de la palabra, pero se ha tropezado con grandes dificultades. Sin embargo se han conseguido transmisiones bastante claras a varios cientos de kilómetros. El principio es el siguiente. Producense, no trenes de ondas electromagnéticas separadas, sino un tren continuo, modificándolo por la acción de un micrófono, delante del cual se habla o se emite el sonido que se quiera transmitir. El receptor comprende un detector electrolítico, o magnético, o de cristales. El teléfono unido al detector permanece silencioso mientras que las ondas no sean modificadas, porque su período es muy corto para que su lámina pueda vibrar al unísono; pero reproduce, por vibraciones de igual período, las modificaciones periódicas producidas por el sonido emitido delante del micrófono, y por consiguiente reproduce el sonido.

Para producir ondas continuas, se ha pensado en emplear un alternador de frecuencia sumamente grande (Ruhmer ha llegado hasta 300 000); pero estos alternadores tienen pequeña potencia (una fracción de vatio). El solo procedimiento práctico hasta ahora ha sido el empleo del *arco cantante*, inventado primero por Duddell y perfeccionado por Poulsen. Este procedimiento consiste en hacer brotar un arco eléctrico a (fig. 1031) entre un electrodo metálico, enfriado por una circulación interior de agua, y un electrodo de carbón, estando este arco en una atmósfera de hidrógeno, con un condensador C en derivación en sus

electrodos. En los alambres que llevan al arco la corriente de la dinamo D. se deben añadir carretes de self BB. En estas condiciones, el circuito viene a ser el centro de oscilaciones de gran frecuencia (hasta unas

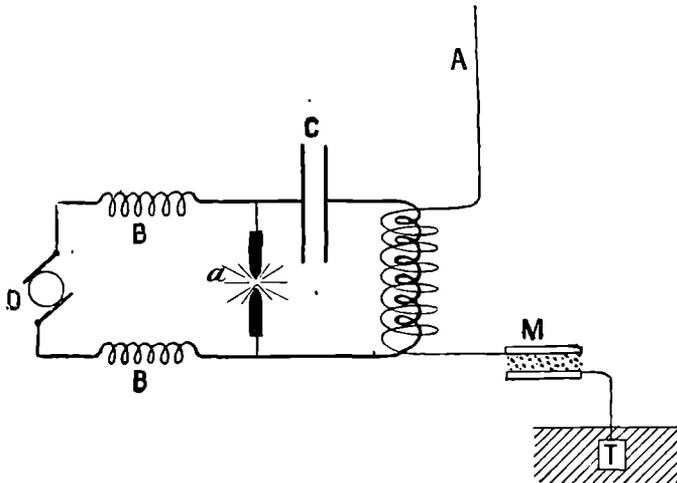


Fig. 1031.

400 000). Esta corriente oscilatoria sirve para excitar una antena A por inducción. En el circuito antena-tierra se intercala el micrófono M. Esta disposición ha sido perfeccionada en Francia por los tenientes de navío Colin y Jeance, que emplean varios micrófonos en derivación, cada uno de los cuales está atravesado por una corriente menos intensa, lo cual mejora mucho la transmisión.

CAPÍTULO V

ACCIONES FISIOLÓGICAS DE LAS CORRIENTES Y DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS APLICACIONES MEDICINALES

1043. **Efectos fisiológicos de las corrientes.** — *Antiguos experimentos.* — Si se cogen con ambas manos los extremos de los alambres de una pila o de un generador de poca fuerza electromotriz, se recibe una ligera conmoción, sobre todo si las manos están mojadas con agua acidulada o agua salada, lo cual aumenta su conductibilidad. La conmoción es más viva al soltar los alambres, por causa de la fuerza electromotriz de self-inducción que en ese momento se produce.

Los efectos de la corriente no son los mismos sobre los nervios sensitivos, o los motores, o los músculos: en los primeros se siente dolor; en los segundos, conmoción; y en los músculos, contracción.

Las corrientes alternas de débil frecuencia (de 40 a 50 períodos por

segundo) tienen, generalmente, acciones más intensas que las corrientes continuas.

Experimentos recientes. — A consecuencia del desarrollo considerable de las aplicaciones de la electricidad, en las cuales se emplean altas tensiones (110 voltios en general para el alumbrado, 500, a 600 voltios para la tracción y hasta 140 000 voltios para los transportes de energía) se han producido con frecuencia accidentes graves y aun mortales. Esto ha provocado recientemente estudios sistemáticos sobre los efectos de las corrientes industriales. A primera vista, estos efectos aparecen muy variados, y hasta cierto modo incoherentes. En una parte, un obrero recibe ligeras heridas al contacto de una línea a 1 000 voltios, mientras que en otra parte recibe la muerte por haber tocado un alambre de 100 voltios. Esto consiste en que la acción de la corriente depende de una multitud de circunstancias. Una de las más importantes es la perfección del contacto entre los cuerpos y el conductor tocado, que puede modificar considerablemente la resistencia. Según el contacto, la resistencia del cuerpo humano puede variar de 1 000 a muchos miles de ohmios. Por otra parte, los efectos dependen mucho del trayecto que sigue la corriente en el cuerpo : son débiles si la mayor parte de la corriente pasa por la superficie. Por último, también tiene gran importancia el estado fisiológico y físico del sujeto.

Experimentos del Dr Weiss. — El Dr Weiss ha emprendido una serie de experimentos metódicos en el perro, explorando al animal de diversos modos. Una cápsula aplicada a la arteria femoral transmitía los movimientos del corazón a un registrador; para los movimientos respiratorios practicaba la traqueotomía y ponía en comunicación, por medio de un tubo, la tráquea con un tambor de Marcy; por fin, un registrador de electroimán inscribía la duración del paso de la corriente, estas tres inscripciones se efectuaban en el mismo cilindro.

Primeramente ha estudiado los efectos de la corriente alterna de frecuencia 42.

1º *Caso en que el corazón se encuentra en el trayecto de la corriente.* — Este caso se verifica haciendo pasar la corriente de una pata delantera a una pata trasera. Con los voltajes de 110 voltios (0,11 amp.) y 140 voltios (1,5 amp.) la muerte se producía por detención del corazón después de algunos segundos. Con 4,600 voltios y 7 amp. el perro resistió, pero murió por una aplicación ulterior de 110 voltios.

En general, un perro muere por detención del corazón con una intensidad superior a 0,07 o 0,08 amp.; pero con una corriente más intensa, no se detiene el corazón. Con 0,045 amp. todos los músculos se contraen sobreviniendo el tétanos, y el perro muere asfixiado por detención de la respiración a los cinco o seis minutos. Pero si se corta a tiempo la corriente, continúa viviendo, mientras que no se le puede reanimar en el caso de detenerse el corazón.

2º *Caso en que el corazón no se encuentra en el trayecto de la corriente y en que ésta atraviesa la cabeza.* — Aplicando 1080 voltios (0,4 amp.) entre la parte superior de la cabeza y el hocico, se provoca la detención de la respiración, pero el corazón late y el animal puede ser reanimado, si la corriente no ha durado mucho tiempo.

3º *Caso de la corriente continua.* — La corriente continua se comporta como la alterna, pero debe ser cuatro veces más intensa para producir el mismo resultado. Por el contrario, si dura más tiempo, provoca alteraciones particulares, debidas a fenómenos de electrólisis que la corriente alterna no podía producir.

Aunque en rigor no se pueda admitir que los fenómenos observados por el Dr Weiss en el perro, se produzcan del mismo modo en el hombre, estos experimentos sugieren las observaciones siguientes.

Para el hombre, con un contacto perfecto, una diferencia de potenciales de 110 voltios es peligrosa, porque puede dar una corriente de

0,07 a 0,09 amperio. Pero es raro que el contacto sea lo bastante perfecto para que la corriente de 110 voltios sea peligrosa.

Jamás se deben tocar los alambres que conducen las corrientes industriales, porque pueden presentar diferencias de potenciales muy superiores a 110 voltios. El contacto con un solo alambre puede ser tan peligroso como el simultáneo con los dos alambres, si uno de ellos está en comunicación con el suelo.

En cuanto a las tensiones inferiores a 150 voltios, es fácil preservarse, envolviéndose las manos en un lienzo seco, o subiéndose a un taburete; es muy conveniente no servirse más que de una mano.

Electrocución judicial. — En América se utiliza la acción de la corriente para las ejecuciones capitales; esto es lo que se llama *electrocución*. El condenado está sujeto a un taburete especial y se le aplican dos electrodos (esponjas mojadas), uno en la pierna y otro en la cabeza. Estos establecen la comunicación con el circuito de una corriente alterna de 1 700 voltios y de una frecuencia de 40 a 50 periodos.

1044. **Efectos de las descargas eléctricas.** — Cuando se acerca la mano a un conductor cargado, se produce una chispa y al mismo tiempo se siente una ligera conmoción. Cuando se toca con una mano la armadura de un condensador cargado, y se acerca la otra a la segunda armadura, se siente una conmoción en el momento que se produce la descarga. Con una botella de Leiden ordinaria (capacidad, algunas milésimas de microfaradio), cargada de modo que dé 1 centímetro de chispa, se siente la conmoción hasta en el pecho. Las baterías de varias jarras pueden dar descargas peligrosas.

Efectos de las corrientes de alta frecuencia. — Las corrientes de alta frecuencia (500 000) producidas por el aparato de Tesla, no son peligrosas, aunque la intensidad sea de 2 o 3 amperios. Respecto de intensidades de 0,5 a 1 amp., el paso de la corriente no se manifiesta por ninguna otra sensación que el calor producido en el organismo; no hay ninguna acción sobre la sensibilidad y la contractilidad. M. Arsonval demostró en 1893 que estas corrientes producen una dilatación vascular general y aumento de combustiones orgánicas, y que tienen una acción preservativa contra las toxinas bacterianas.

1045. **Aplicaciones medicinales de las corrientes continuas y alternas, y de la electrización estática.** — Aplicadas en condiciones convenientes, las corrientes y la electricidad estática tienen efectos benéficos que se utilizan en terapéutica.

1º *Galvanización.* — Llámase *galvanización* la aplicación de las corrientes continuas. Se hace pasar la corriente por ciertas regiones del cuerpo por medio de electrodos formados de esponjas húmedas. La corriente tiene por efectos activar la circulación y nutrición de los tejidos y aumentar la excitabilidad de los nervios motores. La galvanización se utiliza en el tratamiento de parálisis y atrofas musculares.

Conducida por electrodos metálicos, la corriente tiene efectos de electrolisis destructores: se utiliza en el tratamiento de ciertos tumores, evitando así la intervención quirúrgica.

2º *Paradisación.* — Llámase así el empleo de las corrientes inducidas de alta tensión dadas por un carrete de Ruhmkorff. Si se cogen con las manos dos puños metálicos que comuniquen con los extremos de la secundaria del carrete, los músculos se contraen de tal suerte que no se puede soltar los puños. Estas corrientes se aplican por medio de electrodos esponjosos empapados de agua caliente en las atrofas y las parálisis.

3º *Franklinización*. — Consiste en utilizar diversos fenómenos de electrostática. Se electriza al sujeto puesto en un taburete con pies de vidrio, que comunique con un polo de una máquina electrostática. La electricidad sale por las asperezas del cuerpo y de la ropa, resultando de esto una corriente de débil intensidad en la superficie del cuerpo (*baño estático*). Si se acerca a una región del cuerpo una punta en comunicación con el suelo, el viento eléctrico (*soplo*) produce un descenso de temperatura que puede ocasionar una anestesia local. Cuando se acerca una bola metálica en comunicación con el suelo, saltan chispas que producen una sensación de picadura o quemadura en el punto tocado y una excitación de la contractilidad muscular.

Estos efectos han sido aplicados al tratamiento de la enfermedad de la piel (eczema, acne), de enfermedades nerviosas (jaquecas, neurastenia) y aun de dispepsias.

1046. *Aplicaciones de las corrientes de alta frecuencia*. — *Arsonvalización*. — Habiendo sido Arsonval el primero que señaló los efectos terapéuticos de las corrientes de alta frecuencia, se ha dado el nombre de Arsonvalización al empleo de estas corrientes.

Producción de las corrientes de alta frecuencia. — Para producir las corrientes, de alta frecuencia destinadas a las aplicaciones medicinales, Arsonval ha perfeccionado el

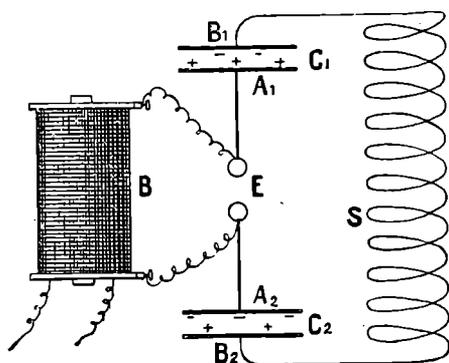


Fig. 1032.

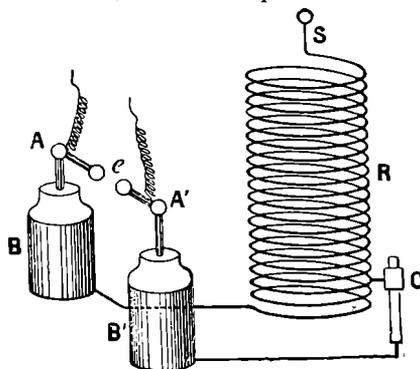


Fig. 1033.

aparato primitivo de Tesla, y emplea un carrete de inducción, o un transformador B, (fig. 1032); los extremos de la secundaria de este transformador están ligados a las armaduras A, A', de dos condensadores C, C', las otras armaduras B, B', están reunidas por un solenoide S. Por otra parte, A, A', comunican con las bolas de un excitador E. La corriente secundaria carga A, y A' (por ejemplo A, positivamente, A', negativamente); B, y B' se cargan de electricidades contrarias. Cuando la diferencia de potenciales entre A, y A', es bastante grande, salta en E una chispa de descarga. Al mismo tiempo, B, y B' se descargan a través de S, que de este modo es recorrido por una corriente oscilatoria.

Resonador Oudin. Está formado por un solenoide R, cuyo extremo superior está aislado y termina en una bola S. Sólo la parte inferior del solenoide sirve de circuito de descarga a las armaduras externas de dos botellas de Leiden AB, A'B', cuyas armaduras internas comunican con la secundaria de un carrete de inducción o de un transformador, y con las dos bolas de un excitador e. Si el contacto móvil C está bien colocado, se produce, por resonancia eléctrica, una corriente de alta frecuencia en todas las espiras. Los conductores metálicos, que están ligados a la última espira se cubren de penachos; el resonador crea, en la pieza donde está, un campo alterno muy intenso; los tubos de Geissler y de Tesla se encienden sin estar reunidos al aparato.

Aplicaciones de las acciones vaso-dilatadoras de las corrientes de alta frecuencia. — El Dr Moutier ha estudiado de un modo particular la acción vaso-dilatadora de las corrientes de alta frecuencia que descubrió Arsonval. Gracias a esta acción, el efecto general de las corrientes de alta frecuencia es bajar la tensión arterial. Ahora bien, ésta precede a la arteriosclerosis, de la cual es quizá la causa. Según esto, se concibe el grandísimo interés de la Arsonvalización, la cual se impone en todos los casos de hipertensión arterial. Usando las corrientes de alta frecuencia, sea por la aplicación directa, sea por autoconducción.

Para la aplicación directa, el enfermo se tiende en una silla larga, debajo de la cual está fija una hoja metálica aislada de él y en comunicación con uno de los extremos del

solenoides S (fig. 1032), cuyo otro extremo está ligado a la silla y, por consiguiente, al enfermo. Este forma en cierto modo una de las armaduras de un condensador, que se carga y se descarga según las alternancias de la corriente. Pero el procedimiento del lecho-condensador no da resultados tan seguros como el de la autoconducción que el Dr Moutier prefiere.

La *autoconducción* consiste en colocar al enfermo en el solenoide S (fig. 1032) que en este caso es vertical y de dimensiones suficientes para que el enfermo pueda caber en él sentado. Las variaciones de la corriente en el solenoide determinan, por inducción, corrientes alternas de igual frecuencia en el cuerpo del enfermo.

En caso de que la hipertensión arterial esté localizada (en el cerebro o en el abdomen por ejemplo), el Dr Moutier emplea un solenoide de poca altura, con algunas espiras, y colocado en el nivel de la región enferma.

Esta aplicación ha servido de guía para descubrir un fenómeno curioso. Sucede con frecuencia que ciertos enfermos que padecen de hipertensión abdominal, presentan, por una especie de reacción, hipotensión de las arterias periféricas (arteria radial por ejemplo). La aplicación de la Arsonvalización en la región enferma hace desaparecer al mismo tiempo la hipertensión de esta región y la hipotensión periférica.

La acción hipotensiva o vaso-dilatatoria de las corrientes de alta frecuencia permite la evacuación de los cálculos, y por lo mismo conviene especialmente al tratamiento de las litiasis biliar y renal.

Finalmente, las corrientes de alta tensión y alta frecuencia constituyen una de las mejores medicaciones contra la neurastenia.

Aplicaciones del resonador Oudin al tratamiento de las enfermedades de la piel. — Utilizanse las corrientes de alta tensión y alta frecuencia de este resonador por medio de un excitador de pincel metálico que se liga a la bola S, pasando este pincel a unos centímetros de la piel. Estas aplicaciones tienen enérgica acción terapéutica sobre las enfermedades de la piel.

Aplicaciones de los efectos térmicos de las corrientes de alta frecuencia. — *Electrocoagulación.* — Al atravesar los tejidos, las corrientes de alta frecuencia producen una elevación de temperatura que el Dr Doyen ha utilizado en la *electrocoagulación* de los tumores cancerosos. Esto se funda en el hecho de que los tejidos (o *neoplasmas*) de estos tumores son más conductores que los tejidos sanos.

En el aparato del Dr Doyen, se aplica contra el abdomen del enfermo un ancho electrodo formado de una lámina de estaño (electrodo *pasivo*); en el tumor se introduce un electrodo mucho más pequeño y de forma variada según sea la región del tratamiento (electrodo *activo*). Los dos electrodos están ligados a los extremos del solenoide S (fig. 1032), y entonces se deriva en el cuerpo una corriente de alta frecuencia : su intensidad, medida con un amperímetro térmico, puede llegar a 10 amperios. Por causa de la pequeña superficie del electrodo activo y de la conductibilidad del tumor, la densidad de la corriente es muy grande en éste, y llega a calentarse de tal manera, que se coagulan las células del neoplasma, y enseguida se desprende por sí solo el tumor. Los otros tejidos se calientan muy poco, porque la superficie que atraviesa la corriente crece a medida que se dirige hacia el electrodo pasivo; los vasos sanguíneos están protegidos, porque los refresca sin cesar la circulación de la sangre.

LIBRO XIII

METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA

CAPÍTULO PRIMERO

METEOROS

1047. **Objeto de la meteorología.** — Se llama *meteoros* a los fenómenos que se producen en la atmósfera, y *meteorología* a la parte de la física que tiene por objeto el estudio de los meteoros.

Los meteoros se dividen en : 1º. *meteoros aéreos* : los vientos, los ciclones, los tornados, las trombas ; 2º. *meteoros acuosos* : las nubes, las nieblas, la lluvia, el granizo, el rocío, la nieve ; 3º. *meteoros eléctricos* : las tempestades, el rayo, las auroras boreales ; y 4º. *meteoros luminosos* : el arco iris, los halos, los parhelios.

La meteorología es una aplicación de la física a los fenómenos de la atmósfera. Aquella ciencia ha recibido importantes desarrollos, y ofrece hoy al marino, al agricultor, al higienista, aplicaciones de gran interés.

METEOROS AÉREOS

1048. **Vientos, su causa.** — Los *vientos* son corrientes aéreas que reconocen por causa diferencias de temperatura y por consiguiente de densidad entre regiones de la atmósfera más o menos distantes. El aire, calentándose en contacto con el suelo, se eleva lo mismo que los gases de la combustión en nuestras chimeneas, y así se produce un transporte semejante al que se ha visto formarse en los líquidos calentados por su parte inferior. De ahí corrientes ascendentes primero, después, dilatándose a medida que la presión disminuye, el aire se enfría y deja de elevarse. Las corrientes se hacen entonces horizontales y se dirigen, por las altas regiones de la atmósfera, desde las regiones calientes hacia las frías; esos son *vientos de impulsión*. Por el contrario, en las regiones bajas, el aire caliente que se eleva tira como los gases en una chimenea, por lo cual se producen corrientes que van desde las partes frías hacia las calientes; estos son *vientos de aspiración*.

Dirección y velocidad de los vientos. — *Anemómetros.* — *Rosa de los vientos.* — Aunque los vientos soplan en todas direcciones, se distinguen ocho principales, que son : el *norte*, el *nordeste*, el *este*, el *sudeste*, el *sud*, el *sudoeste*, el *oeste* y el *norroeste*. Los marinos dividen además los intervalos entre esas 8 direcciones en 4, lo que hace en todo 32 direcciones, que se distinguen respectivamente por el nombre de *rumbos*. El trazado de esos 32 rumbos sobre un círculo, en forma de estrella, es denominado *rosa de los vientos*.

La dirección del viento se determina por medio de veletas; en cuanto a su velocidad, se mide por medio del *anemómetro*. Se llama así a un pequeño molino de alas que el viento hace girar : del número de vueltas dadas durante cierto tiempo se deduce la velocidad. En los climas templados la velocidad media es de 4 a 6 metros por segundo. Con una velocidad de 2 metros, el viento es moderado; con 10 metros, fresco; con 20, fuerte; de 25 a 30 metros, tempestuoso; y de 30 a 40 metros, huracanado. En general, se observa

que el viento es cada vez más fuerte a medida que nos elevamos en la atmósfera : en la cumbre del Puy de Dome (1 467 m.) se han observado vientos cuya velocidad pasaba de 60 metros por segundo.

Vientos regulares o alisios. — Se denominan *vientos regulares* o *alisios* los vientos que soplan todo el año en una dirección constante. Obsérvanse lejos de las costas, en la zona tórrida, a ambos lados del ecuador, hasta a los 30 grados de latitud : soplan del nordeste al sudoeste en el hemisferio boreal y del sudeste al noroeste en el austral.

Los vientos alisios tienen por causa la aspiración permanente que se produce bajo el ecuador por efecto de la gran elevación de temperatura del aire en la superficie de los continentes y de los mares. Encima de estos últimos el aire está además saturado de vapores de agua que disminuyen su densidad. Por esta doble causa, la presión es siempre menor en las regiones ecuatoriales que en las regiones norte y sur, y de ahí resultan, en cada hemisferio, dos corrientes de sentidos contrarios, una de aire caliente, que va del ecuador hacia el polo, ocupando las altas regiones de la atmósfera ; la otra, de aire frío, dirigida desde el polo hacia el ecuador, y que ocupa las regiones inferiores, por efecto de su mayor densidad. Si la tierra estuviese inmóvil, esas corrientes avanzarían en cada punto siguiendo un meridiano; pero no puede ser así a causa de la rotación de la tierra de occidente a oriente. En efecto, como la atmósfera participa de este movimiento, a medida que la corriente salida del polo avanza en la dirección del sur, penetra en capas de aire animadas de una velocidad de rotación mayor que la suya ; se dirige, pues, hacia oriente con mayor lentitud que las capas que atraviesa. En consecuencia, se inclina al oeste tanto más cuanto más se acerca al ecuador, y de ahí un viento que sopla del nordeste. En resumen, en el hemisferio norte, la corriente polar sopla primero del norte, luego del nordeste, y por fin del este ; tal es, en ambos hemisferios, el origen de los vientos alisios.

Por la misma razón, en el hemisferio sur, la corriente se inclina también hacia el oeste, de tal modo que el alisio sopla primero del sur, luego del sudeste y por fin del este.

Antes se creía que, en las altas regiones de la atmósfera, se producía un fenómeno semejante, pero en sentido contrario : el viento superior era llamado *contra-alisio* ; se le suponía, en el hemisferio norte, por ejemplo, dirigido del sudoeste al nordeste. Pero la exploración de la alta atmósfera, por medio de globos-sondas, no ha confirmado esta hipótesis ; es muy verosímil que las corrientes de retorno son complicadas.

Región de las calmas. — Los alisios de los dos hemisferios, aunque convergen hacia el ecuador, no producen en éste más que un viento muy ligero. En efecto, como su dirección se hace entonces vertical, su resultante horizontal tiende a ser nula ; de ahí las calmas a que se da el nombre de *calmas ecuatoriales*, turbadas sin embargo por tempestades casi diarias.

La región de las calmas es variable : en el norte de África, por encima del Sahara, llega hasta los 20 grados de latitud norte ; sobre el Atlántico a los 10° de latitud N. En el Pacífico, la región de las calmas se separa poco del ecuador. Sus variaciones son más grandes en verano que en invierno, y en general presenta las mismas sinuosidades que las curvas de máxima temperatura.

Se ha observado también, cerca de los trópicos, en la zona donde comienzan los alisios, una región de calmas, pero menos bien caracterizada que la primera ; son las *calmas tropicales*.

Hay, pues, que considerar, a partir del ecuador : 1°. la región de las calmas ecuatoriales ; 2°. la de los alisios ; 3°. la de las calmas tropicales ; y 4°. la región de los vientos variables.

Vientos periódicos, monzones, simún, brisa. — Los *vientos periódicos* son unos vientos que soplan regularmente en una dirección, en las mismas estaciones o en las mismas horas del día ; tales son el monzón, el simún y la brisa.

Se llama *monzones* a unos vientos que soplan seis meses en una dirección y seis meses en la otra. Se les observa principalmente en el mar y golfo de Arabia, en el golfo de Bengala y en el mar de China. Durante el estío se dirigen hacia los continentes, y en el invierno soplan en sentido contrario.

Los monzones del verano reconocen por causa la alta temperatura que alcanza en la primera estación la vertiente meridional de los montes Himalaya. Una capa de aire caliente se eleva a lo largo de esa vertiente, y, dando origen a una poderosa aspiración de los alisios del sudeste, los transforma en monzones, de la mar hacia el continente. Durante el invierno, por el contrario, como el continente se enfría más que el mar, la aspiración se produce encima del Océano Índico, y los monzones soplan en dirección opuesta a la primera. Todas las grandes cadenas de montañas producen efectos semejantes.

El *simún* es un viento ardiente que sopla de los desiertos de Asia y de África, y que está caracterizado por su alta temperatura y por las arenas que eleva en la atmósfera y que transporta consigo. Cuando ese viento sopla, el aire se oscurece, la piel se seca, la respiración se acelera y la sed se hace inextinguible.

Este viento es llamado *sirocco* en Italia y *simún* en Argel, donde sopla viniendo del Sahara. En Egipto lleva el nombre de *khamsin*, y se lo observa desde fines de Abril hasta Junio. Para preservarse de los efectos de una transpiración cutánea demasiado rápida ocasionada por este viento, los indígenas de África se untan el cuerpo con grasa.

La *brisa* es un viento que sopla sobre las costas, desde el mar hacia la tierra durante el día, y de la tierra hacia el mar durante la noche, es decir, desde la región más fría hacia la región más caliente. En efecto, en las horas del día el suelo se calienta más que el mar, por lo que el aire se dilata más sobre la tierra que sobre las aguas, sube y es reemplazado por una corriente de aire más denso que viene desde el mar en dirección do la tierra. Pero por la noche el suelo se enfria más que el agua del mar, a causa de la radiación, y el mismo fenómeno se produce en sentido contrario. La brisa marina empieza después del nacimiento del sol, aumenta hasta las tres de la tarde, decrece

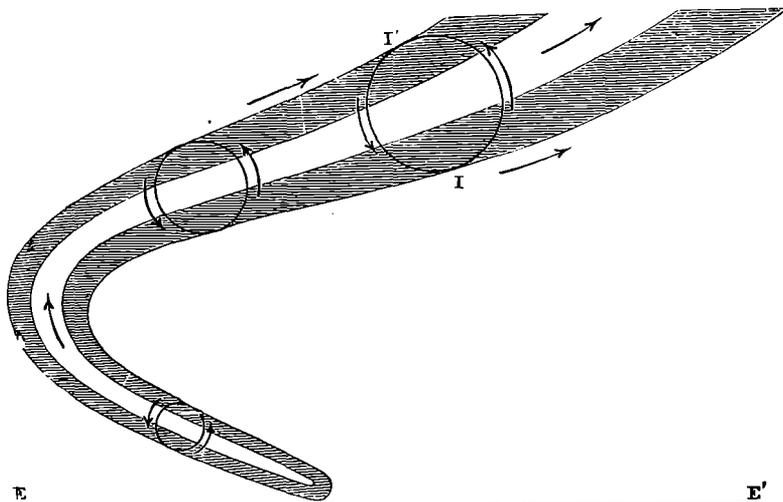


Fig. 1034.

hasta anochecer, y se cambia en brisa de tierra después que el sol se pone. Las brisas terrestres y marinas sólo se dejan sentir a escasa distancia de las costas. Las brisas, regulares entre los trópicos, lo son menos en las zonas templadas, y apenas se la percibe en las costas de Groenlandia. La proximidad de las montañas da también origen a brisas periódicas.

Vientos variables. — Los *vientos variables* son unos vientos que soplan tan pronto en una dirección como en otra, sin que se pueda indicar ninguna ley que presida a su dirección. En las latitudes medias, la dirección de los vientos es muy variable; avanzando hacia los polos, esta irregularidad aumenta, y bajo la zona glacial los vientos soplan a veces de varios puntos del horizonte. A medida que nos acercamos a la zona tórrida, se van haciendo más regulares. El viento del sudoeste es el que domina en el norte de Francia, en Inglaterra y en Alemania; en el mediodía de Francia, la dirección de las corrientes atmosféricas se inclina más hacia el norte; en España y en Italia, predomina el viento norte.

1049. *Ciclones.* — Se llama así a unas masas considerables de aire animadas de un movimiento giratorio muy rápido alrededor de un eje vertical. Estos meteoros se originan en la región de las calmas ecuatoriales, donde tienen siempre por causa una desigual velocidad en los alisios que convergen uno hacia otro, viniendo de los dos hemisferios.

Los ciclones no están solamente animados de un movimiento giratorio, sino también de uno de translación, en virtud del cual se dirigen a veces hacia las zonas templadas. La velocidad del movimiento de rotación alcanza su máximo a una distancia media del centro del ciclón, y se eleva entonces hasta 250 kilómetros por hora. El de translación que

crece con la distancia al ecuador, se halla comprendido en los límites de 15 a 45 kilómetros por hora.

En el hemisferio austral, la rotación se opera siempre de oeste a este pasando por el norte. En el hemisferio boreal, la rotación es de sentido contrario. En cuanto a la traslación, se verifica primeramente en los dos hemisferos de este a oeste; luego se inclina hacia el este.

Representando el ecuador por la línea EE', la figura 1034 indica la marcha y el desarrollo de un ciclón en el hemisferio boreal. El diámetro inicial, que es al principio de 250 a 400 kilómetros, crece progresivamente, y alcanza, en las latitudes elevadas, hasta 2000 kilómetros. En el centro se halla una región relativamente en calma*. De las dos regiones laterales, la marcada en I, donde las dos velocidades de rotación y traslación se suman, es el *borde peligroso*, mientras que en I', en que las velocidades son opuestas, se encuentra el *borde manejable*. Los ciclones vienen acompañados de una baja considerable del barómetro, sobre todo en el centro.

Estos temibles fenómenos, que son por fortuna poco frecuentes, se observan sobre todo en los mares de China y de las Indias, donde se les conoce con el nombre de *tifones*, y también en las Antillas. Señálanse siempre por espantosos desastres en mar y tierra.

1050. **Tornados.** — Los *tornados* son unas ráfagas violentas que se producen en la región de las calmas ecuatoriales, donde acompañan, en general, a las tempestades tan frecuentes en esa zona. Esos meteoros se hallan, como los ciclones, animados de un movimiento giratorio debido a la desigual velocidad de los alisios. Los tornados se anuncian por una pequeña nube blanca que aparece a gran altura. Esta nube crece, baja lentamente, y al acercarse a la tierra se rodea de una masa sombría, que oscurece rápidamente toda la atmósfera. Por fin, del punto más negro en medio de los resplandores del rayo, se lanza con una extrema violencia el torbellino que constituye el tornado.

1051. **Trombas.** — Las *trombas* consisten en acumulaciones de vapores, suspendidos en las capas inferiores de la atmósfera, que atraviesan, animados en general de un movimiento giratorio bastante rápido para arrancar los árboles, derribar las casas, romper y destruir todo lo que encuentran ante su paso.

Estos meteoros, que casi siempre se presentan acompañados de lluvia y granizo, despiden a menudo relámpagos y rayos, produciendo en toda la zona que recorren, el ruido de una carreta que marcha sobre un camino cubierto de piedras. Gran número de trombas carecen de movimiento giratorio, y la cuarta parte de las que se observan, se originan en una atmósfera tranquila, a lo menos en su parte inferior.

Las trombas se manifiestan lo mismo sobre los mares que sobre los continentes, y entonces el fenómeno toma un aspecto notable. Las aguas se agitan y se elevan en forma de cono, mientras que las nubes descienden a su vez en forma de cono invertido, que forma con el primero, al reunirse ambos por sus vértices, una columna continua desde la mar hasta las nubes. Sin embargo, aun en plena mar *el agua de las trombas no es nunca salada*, lo que prueba que esos meteoros están sobre todo formados por vapores condensados, y no por el agua de mar, elevada por aspiración.

Las trombas duran muy poco, pues el camino que recorren es sólo de unos cuantos kilómetros. En cuanto a su extensión o anchura, se han observado algunas cuyo diámetro no pasaba de 200 metros. Sin embargo, a menudo adquieren una violencia tal, que derriban las casas, arrancan los árboles más gruesos y los arrastran por espacios de más de 100 metros.

Kaemtz admite que esos fenómenos se deben a dos vientos opuestos que pasan uno al lado del otro, o bien a un viento muy vivo que reina en las altas regiones de la atmósfera. Peltier les ha atribuido un origen eléctrico

METEOROS ACUOSOS

1052. **Nubes.** — Las *nubes* son unas masas de vapores condensados en forma de gotas de extremada pequeñez, a una altura más o menos grande en la atmósfera. Esos fenómenos resultan siempre de la condensación de los vapores que se elevan de la tierra. Según las apariencias que presentan se divide a las nubes en cuatro especies princi-

* En realidad, la trayectoria de una masa de aire en un ciclón es una espiral que gana el centro del ciclón después de cierto número de vueltas. De ahí resulta que en todo punto, la velocidad del viento, en vez de ser perpendicular a la recta que une este punto al centro del ciclón, está más inclinada en la dirección de este centro.

pales, que son los *cirros*, los *cúmulos*, los *estratos* y los *nimbos*. Estas cuatro especies de nubes están representadas en la figura 1035.

Los *cirros* (arriba y a la izquierda de la figura) son unas pequeñas nubes, blanquocinas, que presentan el aspecto de filamentos separados, semejantes a los de la lana cardada. Son las nubes más altas, y, vista la baja temperatura de las regiones que ocupan, se las considera como formadas de partículas de hielo o de copos de nieve. Su aparición precede a menudo un cambio de tiempo.

Los *cúmulos* (en el centro y a la izquierda) son nubes redondeadas, que presentan el aspecto de montañas puestas unas sobre otras. Son más frecuentes en verano que en invierno, y después de haberse formado por la mañana, se disipan generalmente por la noche. Si a esta hora son, por el contrario, más numerosas, y sobre todo si encima de ellas se observan cirros, hay que temer lluvia o tormentas.

Los *estratos* (abajo y a izquierda) son unas capas nebulosas horizontales, que ocupan



Fig. 1035.

las regiones inferiores de la atmósfera, y que parecen muy estrechas por un efecto de perspectiva. Se forman al ponerse el sol y desaparecen al salir este astro; frecuentes en otoño, son raras en la primavera.

Por fin, los *nimbos* o nubes de lluvia (a derecha) son nubes que no afectan ninguna forma característica; se distinguen sólo por su color oscuro uniforme, y por las franjas que ostentan en sus bordes.

La altura de las nubes es muy variable; por término medio varía entre 1 200 y 1 400 metros en invierno, y entre 3 000 y 4 000 en verano. Pero con frecuencia es mucho mayor. Gay-Lussac, en su ascensión aerostática, en julio, a una altura de 7 016 metros sobre el nivel del mar, observó por encima de su globo cirros que parecían estar a una altura considerable. M. d'Abbadie ha visto, en Etiopía, nubes tempestuosas que se hallaban apenas a 212 metros del suelo. En cambio se ha observado que la cima de ciertos cúmulos tempestuosos pasaba de 10 000 metros de altura.

Para explicar la suspensión de las nubes en la atmósfera, se admite con Saussure, que las nubes y las nieblas están formadas de gotecitas de agua en extremo pequeñas, que flotan en la atmósfera, donde se encuentran sostenidas por las corrientes de aire caliente ascendentes, a la manera que los vientos levantan el polvo. En cuanto a la inmovilidad que presentan las nubes en el sentido de la vertical, sólo es aparente, en sentir de estos físicos. A menudo las nubes bajan poco a poco (81); pero entonces su parte inferior se disipa continuamente en las capas más calientes que atraviesa mientras que su parte

superior aumenta sin cesar, por la adición de nuevos vapores que se condensan : así se explica por qué parecen conservar una altura constante.

1053. **Formación de las nubes.** — Son varias las causas que contribuyen a la formación de las nubes.

1º La baja temperatura de las altas regiones de la atmósfera. En efecto, por efecto del sol se desprenden constantemente de la tierra y de las aguas, vapores que se elevan en el aire en virtud de su menor densidad. Estos vapores encuentran capas de aire cada vez más frías, descienden pronto a la temperatura de saturación y entonces es cuando, condensándose en gotecillas infinitamente pequeñas, dan origen a las nubes.

2º Las corrientes de aire caliente y húmedo, que se elevan durante el día en la atmósfera, experimentan una presión cada vez más débil, de lo cual resulta una dilatación que es un manantial de frío intenso, y que produce la condensación de los vapores. Por estas razones es por lo que las altas montañas, deteniendo las corrientes aéreas y obligándolas a elevarse, son una causa abundante de lluvia.

3º Una corriente de aire caliente y húmedo que se mezcla con un aire más frío, experimenta un enfriamiento que da también origen a una condensación de vapores. Así es cómo los vientos calientes y húmedos del sur y del sudeste, al mezclarse con el aire más frío de nuestras latitudes producen la lluvia. Los vientos del norte y del nordeste, que son fríos, tienden también, mezclándose a nuestra atmósfera, a condensar sus vapores; pero como, por efecto mismo de su baja temperatura estos vientos son muy secos, la mezcla resultante alcanza raras veces la saturación, y generalmente no dan lluvia.

1054. **Lluvia.** — **Pluviómetro.** — La lluvia es la caída, en estado de gotecillas, del agua que proviene de la condensación en las altas regiones de la atmósfera, de los vapores que se elevan del suelo. En general, las nubes, que se ven en el aire, no son las que dan la lluvia; sino que ésta se produce en el momento mismo de la condensación de los vapores y las gotas son tanto más grandes cuanto de mayor altura caen.

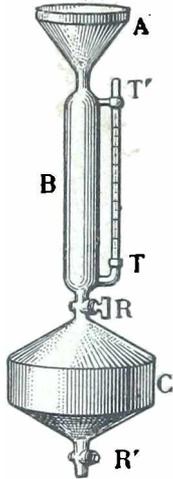


Fig. 1036.

Se llama altura de la lluvia que cae en un lugar, en un intervalo de tiempo dado, a la altura de la capa que formaría el agua de lluvia caída durante este tiempo si no se derramase ni evaporase ninguna cantidad. La cantidad de lluvia que cae en un lugar se mide con el pluviómetro o eudiómetro. Un pluviómetro se compone de un embudo vertical A (fig. 1036) de bordes afilados, terminado en un recipiente B que recoge el agua de lluvia. Un tubo de cristal TT' comunica con la parte inferior de B, y está abierto a la atmósfera en T'. El agua sube en él a la misma altura que en B. Una graduación señalada en el cristal indica esta altura, que representaría evidentemente la altura de la lluvia caída a partir del momento en que se ha vaciado el aparato, si B tuviese la misma sección que A. Pero, en general, se procura que la sección de B sea 10 veces menor que la de A, y en este caso, el aparato se llama *decuplador* : a cada altura leída en el tubo corresponde una altura de lluvia caída 10 veces más pequeña. El aparato representado en la figura 1018 es el pluviómetro totalizador de Hervé Mangón. Tras cada operación

diaria vaciase si ha lugar, por la llave R, el agua de B, en el recipiente C. Después se registran estas observaciones vaciando de cuando en cuando el agua de C en una probeta graduada; el volumen medido de este modo debe ser igual a la suma de los volúmenes deducidos de las observaciones diarias.

También se construyen pluviómetros registradores. En uno de los modelos de Richard, el agua caída se acumula en un vaso y levanta un fiel de balanza cuyo movimiento se transmite a una pluma móvil en un tambor rotatorio. Cuando la pluma se halla en la parte superior de su carrera establece un contacto eléctrico que acciona un electroimán el cual provee un sifón; vaciase el recipiente y la aguja vuelve al cero, pronta para volver a empezar su ascensión.

Los pluviómetros deben colocarse en lugares muy descubiertos.

Gran número de causas locales pueden hacer variar la cantidad de agua que cae en los diversos países; pero, en igualdad de circunstancias, en los países cálidos debe llover más porque en ellos es más abundante la vaporización. Obsérvese, en efecto, que la cantidad de lluvia crece de los polos al ecuador. La altura del agua que cae anualmente en París es 0,564 m.; en Burdeos, 0,650 m.; en Madera, 0,767 m.; en la Habana, 2,32 m.; en Santo Domingo 2,75 m.; en Veracruz, 4,60 m.; en Marianhao (Brasil), 7,10 m., y en Tcherrapundji (India inglesa), 12,50 m.; la cantidad media, en todo el globo, es 0,90 m.

1055. **Nieblas.** — **Brumas.** — Las *nieblas* son masas de vapores de agua que, condensadas en la atmósfera, ocupan sus regiones bajas y turban la transparencia de éstas. Son verdaderas nubes que se forman en la superficie del suelo, por el enfriamiento de las capas inferiores de la atmósfera.

Las *brumas* son nieblas poco densas.

1056. **Rocío, sereno, escarcha.** — El *rocío* no es más que vapor de agua que se condensa y se deposita en forma de gotas sobre los cuerpos durante la noche. Este fenómeno se debe al enfriamiento que experimentan por efecto de la radiación nocturna los cuerpos colocados en la superficie del suelo. Como su temperatura baja entonces varios grados respecto de la del aire, sucede, sobre todo en las estaciones calientes, que esa temperatura llega a ser inferior a la en que la atmósfera quedaría saturada. Entonces es cuando las capas de aire que se hallan en contacto con los cuerpos, y sensiblemente a la misma temperatura que éstos, depositan una parte del vapor que contienen; fenómeno análogo al que se produce cuando se lleva a una habitación húmeda y caliente una botella de agua fresca: los vapores del agua se condensan sobre sus paredes.

Con arreglo a esta teoría que se debe al físico inglés Wells, todas las causas que favorecen el enfriamiento de los cuerpos deben aumentar también el depósito de rocío: esto es lo que la experiencia demuestra. Esas causas son: el poder emisor de los cuerpos, el estado del cielo y la agitación del aire.

Los cuerpos que tienen un gran poder emisor, deben condensar más vapor, puesto que se enfrían más. En efecto, el depósito de rocío es generalmente nulo sobre los metales cuyo poder emisor es escaso, sobre todo si están pulimentados; mientras que la tierra, la arena, el vidrio, las plantas, que tienen un gran poder emisor, se cubren abundantemente de rocío.

Si la atmósfera está pura, sin nubes, los espacios planetarios, que se encuentran a una temperatura muy baja, sólo envían a la tierra una cantidad de calor inapreciable, y como el suelo se enfría entonces rápidamente por la radiación nocturna, hay un abundante depósito de rocío. Pero si hay nubes, éstas, cuya temperatura es mucho más elevada que la de los espacios planetarios, envían su calor hasta el suelo, y, en consecuencia, los cuerpos de la superficie de la tierra experimentan sólo un débil enfriamiento, por lo cual no se efectúa depósito de rocío.

El viento ejerce también influencia en la cantidad de vapor que se deposita. Si es débil la aumenta renovando el aire; pero si es fuerte, la disminuye calentando los cuerpos por su contacto, y no dejando al aire el tiempo de enfriarse. Por último, el depósito de rocío es tanto más abundante, cuanto más húmedo está el aire, pues éste se halla así más cerca de su punto de saturación.

El *sereno* es una precipitación de agua en forma de lluvia muy fina, sin que se observe ninguna nube. Este fenómeno se produce durante los grandes calores, en los lugares húmedos, al ponerse el sol, cuando las capas inferiores de la atmósfera se enfrían por debajo del punto de saturación.

La *escarcha* o *helada* resulta, como el rocío, de los vapores contenidos en la atmósfera, cuando esos vapores se condensan sobre cuerpos cuya temperatura es inferior a cero. La forma de copos que presentan los pequeños cristales de que la escarcha está formada, indica que aquí los vapores se condensan inmediatamente sin pasar por el estado líquido. La escarcha se deposita, lo mismo que el rocío, sobre los cuerpos que emiten más calor, tales como las ramas y hojas de los árboles, y el depósito se efectúa principalmente sobre las partes vueltas hacia el cielo o contra el viento.

1057. **Nieve, granizo helado, verglas.** — La *nieve* es agua solidificada en pequeños cristales de forma de estrellas, diversamente ramificados y que flota en la atmósfera. Estos cristales proceden de la congelación de las gotecillas que forman las nubes, cuando su temperatura desciende por debajo de cero. Son tanto más regulares cuanto más tranquilo se halla el aire en que se forman. Para observarlos, se les recoge encima de un cuerpo negro y se los mira con una lente de mucho aumento. La regularidad y al mismo tiempo la variedad de sus formas son verdaderamente admirables. La figura 1037 hace ver algunas de las formas que presentan los cristales de nieve, cuando se les observa con el microscopio. Sus variedades ascienden a varias centenas.

En un lugar cualquiera nieve tanto más cuanto más cerca de los polos se halla, o cuanto más elevado se encuentra por encima del nivel del mar. Hacia los polos, la tierra está constantemente cubierta de nieve; otro tanto ocurre sobre las altas montañas, donde reinan las nieves perpetuas, aun bajo el ecuador.

El *granizo helado*, que es también agua solidificada, está constituido por pequeñas agujas de hielo agrupadas unas contra otras de una manera confusa. Se atribuye su formación a la congelación brusca de las gotecillas de las nubes en un aire agitado.

El *verglas* es una capa de hielo unida y transparente que se deposita sobre el suelo. La condición necesaria para que ese fenómeno se realice es que, siendo inferior a cero la temperatura de la tierra, después de varios días de frío continuo, venga a caer un poco de lluvia : ésta se congela en seguida; pero si continúa lloviendo, el suelo se calienta y el verglas no se forma.

1058. **Granizo.** — El *granizo* es un conjunto de glóbulos de hielo compactos, más o menos voluminosos, que caen de la atmósfera. En los climas templados el granizo se observa principalmente durante la primavera y el verano, y durante las horas de mayor temperatura del día : de noche casi nunca cae. La caída del granizo viene siempre precedida por un ruido particular.

El granizo es generalmente el precursor de las tempestades; es raro que las acompañe, y más raro aún que las siga. El grueso de los granizos es muy variable, alcanzando a veces el de una avellana. Se han visto algunos tan grandes como un huevo de

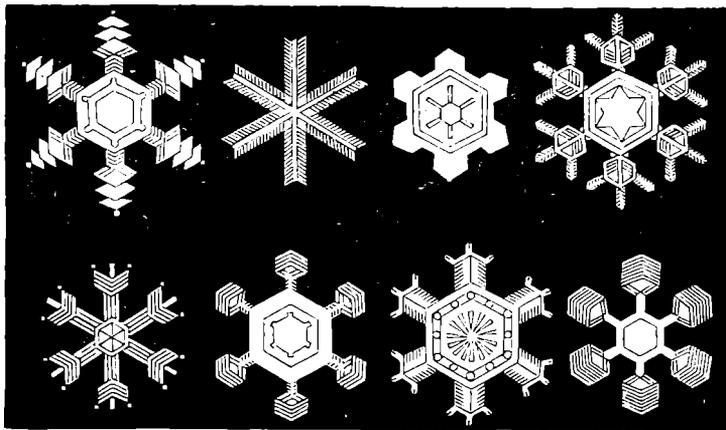


Fig. 1037.

paloma y pesando 200 a 300 gramos. Ninguna teoría explica de una manera satisfactoria la formación de los granizos, y sobre todo cómo pueden alcanzar semejante peso antes de caer.

Saussure admitía que los granizos empiezan a formarse en las altas regiones de la atmósfera, y aumentan de volumen al caer. De la Rive pensaba que el granizo proviene de gotas de agua que se enfrían por debajo de cero y que se solidifican bruscamente. M. Dufour admite también que los granizos son el resultado de la congelación súbita de glóbulos de agua que flotan en la región de las nubes, donde han conservado el estado líquido a una temperatura inferior a cero. Si algunos glóbulos se solidifican, desde que chocan con otros, líquidos todavía, éstos pasan instantáneamente al estado sólido, según se ha visto al tratar de la sobrefusión : los nuevos glóbulos se adhieren a los otros y así llegan los granizos a adquirir el volumen que a veces presentan.

Teoría de M. Plumondon. — Según éste una de las principales causas de la formación del granizo ordinario consiste en el frío que experimentan las gotas de agua que se evaporan al atravesar por aire, seco o enrarecido. Luego, explica la formación de los granizos gruesos y de los extraordinarios que pueden llegar a pesar 100, 500, 1 000 gramos y más, por efecto de sobrefusión, y sobre todo por intervención de diversos fenómenos, que deben su origen a torbellinos tempestuosos; larga permanencia de los granizos en esos torbellinos, en condiciones muy variables de temperatura y humedad; aspiración accidental de agua de la tierra y congelación rápida de esta agua en el vacío axial que produce la fuerza centrífuga, etc.

METEOROS ELÉCTRICOS

1059. **Descubrimiento de la electricidad de las nubes tempestuosas por Franklin.** — Desde que la chispa eléctrica fué conocida, comparóse al resplandor del relámpago, y

el chisporroteo que la acompaña, al estampido del trueno; pero Franklin fué el primero que, por medio de baterías eléctricas, estableció un paralelo completo entre el rayo y la electricidad, indicando en una memoria publicada en 1749 los experimentos necesarios para extraer el fluido de las nubes tempestuosas por medio de puntas metálicas.

Experimento de Dalibard. — Guiado por las ideas teóricas de Franklin, Dalibard, físico francés, levantó en un jardín de Marly, próximo a París, una barra de hierro aislada de 35 m. de altura, la cual barra, por la influencia de una nube tempestuosa, produjo, el 19 de Mayo de 1752, chispas suficientemente intensas para cargar varias botellas de Leyden.

Experimento de Franklin. — Sin embargo, Franklin, por su parte, dispónase a efectuar el experimento que había anunciado; para ello aguardaba a que se terminase un campanario en construcción, cuando se le ocurrió la idea de utilizar una cometa provista de una punta metálica que podía subir a las regiones más elevadas de la atmósfera. Un día tempestuoso de Junio de 1752, y antes de conocer el experimento de Dalibard, dirigióse Franklin con su hijo a un campo próximo a Filadelfia. En él lanzó a volar la cometa, atando a la cometa una llave y a ésta un cordel de seda cuyo objeto era aislar el aparato. Ató, después, el cordel a un árbol. Presentó la mano a la llave y, al principio, no produjo chispa alguna, lo cual le hizo casi perder toda esperanza de éxito; más, al poco rato, cayó una ligera lluvia que, humedeciendo la cuerda la convirtió en buena conductora y la llave produjo la chispa deseada. La emoción del célebre físico fué tan viva, que, según él mismo cuenta, le saltaron las lágrimas.

Estos experimentos se explican admitiendo que las nubes tempestuosas están electrizadas. Entonces, obran por influencia en la punta, que se carga de electricidad contraria y que la pierde por el viento eléctrico. El extremo inferior del conductor se carga también de la misma electricidad que la nube.

1060. **Potencial eléctrico en un punto de la atmósfera.** — En el tiempo más sereno, se observa que los potenciales de los diferentes puntos de la atmósfera no son iguales. Este estudio se efectuó por medio de electrómetros preparados para este efecto.

Ya hemos visto cómo se estudia el potencial en un punto del campo eléctrico. Los métodos que hemos descrito se aplican al campo eléctrico de la atmósfera. También se puede, como hacía Saussure, emplear un electrómetro de panes de oro cuyo vástago central está coronado por un conductor que termina en punta. La punta adquiere un potencial igual al del punto de la atmósfera en que se encuentra. Por lo tanto, si existe alguna diferencia de potenciales entre el punto que ocupa el extremo de la punta y la caja del electroscopio, se desviará este último.

Para medidas de precisión se emplea el método de lord Kelvin, sirviéndose, como igualador de potencial, de un vaso de escurrimiento, de una llama o de una sal de radio.

Para mayor comodidad, se emplea con mucha frecuencia el procedimiento de inscripción fotográfica de las desviaciones del electrómetro.

Resultados generales. — En un cielo sin nubes, el potencial eléctrico del aire aumenta en razón directa de la altura a que se eleva. Lord Kelvin ha hallado, en Aberdeen, a la orilla del mar, una variación de 100 voltios por metro. Mascart y Joubert observaron una variación de 300 voltios.

Este aumento de potencial puede explicarse suponiendo una carga esparcida por el suelo; sería necesario que ésta fuese negativa e igual a 10^{-13} culombios por centímetro cuadrado, lo que correspondería a una tensión eléctrica muy pequeña, por lo cual no podríamos notarla. Esta explicación, presentada primero por Peltier, a título de hipótesis, fué repetida por lord Kelvin. Se halla de acuerdo con los experimentos que acabamos de citar y permite, de este modo, como veremos después, explicar los fenómenos tempestuosos.

Admítase asimismo que el aire está ionizado. En las capas inferiores, las substancias radioactivas del suelo serían las que producen esta ionización; en las superiores, serían la radiación ultravioletada del sol o las partículas desprendidas del sol por la presión de radiación. Los iones negativos provocan más fácilmente que los positivos la condensación del vapor de agua y así se explica por qué las nubes casi siempre están cargadas negativamente. Por el contrario, el aire contiene un exceso de iones positivos.

1060. **Electricidad de las nubes.** — Generalmente, las nubes se hallan cargadas de electricidad negativa. (Nos referimos a los fenómenos que se desarrollan en tiempo sereno, y no durante las tormentas.) Esta conclusión está de acuerdo con el siguiente fenómeno: en tiempo cubierto, el potencial aumenta siempre menos rápidamente con la altitud, que en tiempo sereno, y hasta puede permanecer constante y aun disminuir. Esto se debe a que la nube cargada negativamente obra por influencia en los puntos del

suelo próximos a él, disminuyendo su carga negativa y hasta la puede anular y transformar en carga positiva.

1062. **Fenómenos tempestuosos.** — Una tempestad es una perturbación atmosférica más o menos violenta, caracterizada por descargas eléctricas, acompañadas generalmente de lluvia y a veces de viento y granizo, y hasta de nieve.

Relámpago. — El relámpago es una luz deslumbradora proyectada por la chispa eléctrica que brota entre las nubes cargadas de electricidad. La luz de los relámpagos es blanca en las regiones bajas de la atmósfera; pero, en las regiones elevadas en que el aire está más enrarecido, adquiere un color violáceo, como ocurre en caso análogo a la chispa eléctrica. Se conocen tres clases de relámpagos :

1ª *Relámpagos en zig-zag.* que se presentan en forma de un trazo de fuego con contornos perfectamente determinados y que son del todo comparables a la chispa de las máquinas eléctricas. Estos relámpagos se ramifican mucho. La figura 1038 representa la fotografía de un relámpago obtenido por Trouvelot;

2ª *Relámpagos que abarcan todo el horizonte,* sin presentar ningún contorno aparente, como efectuaría el súbito fogonazo de una explosión de materias inflamables. Estos relámpagos, que son los más frecuentes, parecen producirse en el mismo seno de la nube e iluminan su masa;

3ª *Relámpagos en bola;* estos relámpagos, que a veces son visibles durante más de 10 segundos, descienden de las nubes hasta la tierra con bastante lentitud para que la vista pueda seguirlos. Estos globos rebotan a veces en la superficie del suelo; otras se dividen y hacen explosión con un ruido comparable a la detonación de varios cañones.

Se ha notado que, en general, ésta es la forma en que se presenta el rayo cuando penetra en lo interior de los edificios. El origen de estos relámpagos es desconocido.

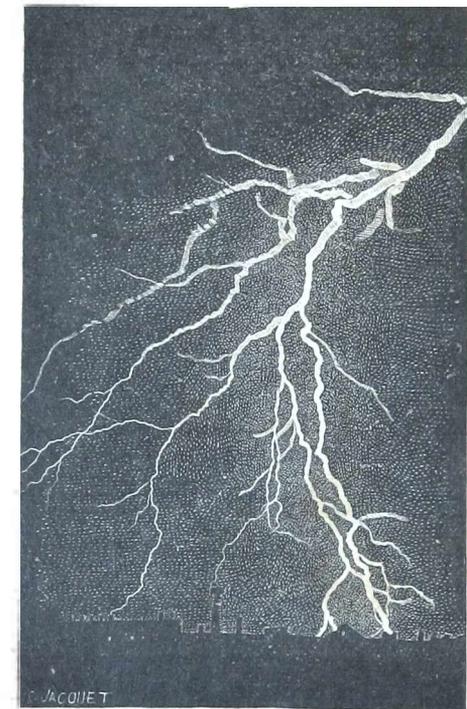


Fig. 1038.

Cuanto a los llamados *relámpagos de calor*, que brillan en las noches de verano, sin que se pueda percibir ninguna nube en el horizonte y sin que se oiga ruido alguno, son relámpagos ordinarios que se producen en las nubes situadas debajo del horizonte a la distancia que el ruido del trueno no puede llegar hasta el oído del observador.

Duración del relámpago. — Wheatstone ha tratado de medir la duración de los relámpagos, por medio de un aparato especial. Consiste en una rueda a la que se da vueltas lo suficientemente de prisa para que permanezcan invisibles sus radios; pero, si los ataca la luz de un relámpago, sea cual fuere la velocidad de rotación de la rueda, ésta aparece completamente inmóvil; su movimiento no es, pues, sensible, mientras dura el relámpago. De ahí dedujo Wheatstone que la duración de un relámpago es inferior a una milésima de segundo. Análogos experimentos se han repetido estos últimos años. Citaremos los de Schmidt, publicados en 1906, los cuales se efectuaron con un disco que daba 50 a 60 vueltas por segundo, y en el cual había una cruz blanca trazada en fondo negro. A la luz de ciertos relámpagos, aparecía completamente clara la cruz. Con la de otros, aparecía varias veces; pero su sucesión ofrecía gran irregularidad, demostrando que el relámpago se componía de una serie de chispas sucesivas. Otros experimentos de Welther, hechos por medio de la fotografía, prueban que los relámpagos son chispas oscilantes. La duración total del relámpago que estalla entre dos nubes puede alcanzar una décima de segundo; los que estallan entre la nube y el suelo duran apenas una millonésima de segundo.

1063. **Ruido del trueno.** — El trueno es la detonación que sucede al relámpago en las

nubes tempestuosas. El relámpago y la detonación son siempre simultáneos; pero, entre ambos fenómenos obsérvase un intervalo de varios segundos debido a que el sonido no recorre sino unos 340 metros por segundo, en tanto que la luz se propaga casi instantáneamente de la nube al ojo del observador.

El ruido del trueno resulta de la sacudida que la descarga eléctrica produce en la nube y en el aire. Cerca del sitio en que cae el rayo, el estampido del trueno es seco y de poca duración. Algo más lejos, oíense ruidos que se suceden rápidamente. A distancia aun mayor, el ruido, al principio débil, se cambia en un prolongado retumbar, de densidad muy desigual. Algunos atribuyen esto a la reflexión del sonido sobre la tierra y las nubes; otros consideran el relámpago, no como una sola chispa eléctrica, sino como una serie de chispas elementales que producen una detonación particular. Esas detonaciones parciales parten de puntos distintamente alejados y de zonas de densidad diferente, de lo cual resulta que, no sólo llegan sucesivamente al oído del observador, sino que producen sonidos de distinta intensidad en este órgano, lo que origina la duración y la desigualdad del fragor del trueno.

El máximo de duración del estampido, observado en París, es de 35 a 45 segundos. En las montañas aumenta esta duración, a causa de la reflexión del sonido.

1064. **Efecto del rayo.** — El rayo es la descarga eléctrica que se opera entre una nube tempestuosa y el suelo. Este, bajo la influencia de la electricidad de la nube, se carga de electricidad contraria, y cuando el esfuerzo que efectúan las dos electricidades para reunirse es superior a la resistencia del aire, la chispa salta, lo que se indica en el lenguaje ordinario diciendo que cae el rayo; pero no hay que entender por eso que el rayo se dirige preferentemente de arriba abajo. Como las chispas artificiales, el rayo tiende a herir en todos sentidos, dirigiéndose siempre hacia los objetos más próximos, los mejores conductores y que se encuentren en relación más íntima con el suelo. Se observa, en efecto, que lo que atrae particularmente el rayo son los árboles, los edificios elevados y los metales. Por eso es tan peligroso en momentos de tempestad colocarse bajo los árboles, sobre todo si éstos son buenos conductores, como las encinas y los olmos. Pero el peligro no es el mismo bajo los árboles resinosos, como los pinos, porque esta clase conduce mal la electricidad.

Los efectos del rayo son muy variados y de la misma naturaleza que los de las baterías; pero con una intensidad mucho más considerable. El rayo mata al hombre y a los animales, inflama las materias combustibles, funde los metales y rompe los cuerpos poco conductores.

Al penetrar en el suelo, el rayo funde las materias silicatadas que encuentra en su camino, y así se producen, en la dirección de la descarga, tubos vitificados, que se denominan *tubos fulminares* o *fulguritas*, y que tienen hasta 10 metros de largo.

Por último, al caer sobre las barras de hierro, las imana, y a menudo invierte los polos de las agujas en las brújulas.

El rayo difunde a su paso un olor que se ha comparado con frecuencia al del azufre inflamado o al de una sustancia fosforosa. Este olor ha sido atribuido a la ozonización del oxígeno del aire.

1065. **Explicación de las tempestades.** — Generalmente se admite que las tempestades se originan de pequeños torbellinos atmosféricos análogos a los ciclones, pero de unos cuantos kilómetros de radio solamente, que poseen al mismo tiempo un movimiento de traslación.

Solo con este fenómeno del torbellino se puede explicar la formación de las nubes. Y en efecto, en el eje del torbellino existe una corriente ascendente que arrastra las masas de aire más o menos húmedas a regiones donde la presión es cada vez más débil; y la dilatación adiabática que se produce basta para originar la condensación del vapor. Una nube formada de este modo, es un conductor puesto cerca del suelo que suponemos cargado negativamente, como ya hemos dicho. Por consiguiente, esta nube se va a electrizar por influencia: *positivamente*, en su parte inferior, y *negativamente*, en sus regiones más elevadas. También puede dividirse esta nube, arrastrada por el torbellino. Así se concibe la formación de nubes con electricidades diferentes, ejerciendo acción unas sobre otras por influencia, Y hasta puede el trabajo del viento aumentar la energía eléctrica de todo el sistema, mediante fenómenos análogos a los de nuestras máquinas de influencia. De ahí provienen naturalmente todos los fenómenos de las tempestades: relámpagos, rayos, etc. Hay que añadir que a pesar del escaso valor de la densidad eléctrica del suelo, el cálculo prueba que así se puede explicar la enorme energía de las descargas de las nubes.

Teoría de Plouanton. — Según éste la tempestad se origina cuando por causa de la combinación de circunstancias locales y de la inminencia de una depresión barométrica, las presiones se igualan en una región. De aquí resulta, primero, un período de calma

puesto que los vientos sólo provienen de las diferencias de presión. Cualquiera ha podido observar el período de calma que precede al nublado. Pero las diferentes capas horizontales del aire, que no se mezclan por falta de viento, no tienen igual humedad; las que están más cerca del suelo, más cargadas de vapor de agua, se calientan más a los rayos del sol, y de ahí resulta en un momento dado una corriente ascendente que debe, como ya hemos visto, acarrear la condensación del vapor de agua. Formada la nube, puede romperse el equilibrio atmosférico, resultando de ahí los vientos y torbellinos que acompañan la tempestad. Ya acabamos de ver cómo se pueden explicar entonces los fenómenos eléctricos que se producen.

También hay tempestades que acompañan a los grandes movimientos de circulación de la atmósfera y que interesan una región más o menos grande.

1066. Pararrayos. — El pararrayos es un aparato destinado a proteger los edificios contra el rayo. El pararrayos se debe a Franklin, que lo inventó en 1735.

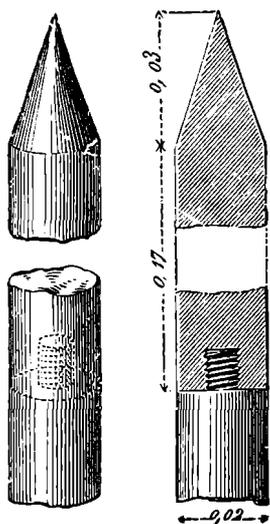


Fig. 1039.

Descripción. — Se distinguen en un pararrayos dos partes: la barra y el conductor. La barra es rectilínea y de hierro; se la coloca en la cúspide de los edificios que se trata de preservar; tiene de 6 a 9 metros de altura y su sección, en la base, es un cuadrado de 5 a 6 centímetros de lado. Esa barra termina en una punta, que debe ser de un metal inalterable: el mejor parece ser el cobre dorado. No hay que hacer demasiado aguda la punta, porque el rayo podría fundirla. Ordinariamente se atornilla y luego se suelda en la extremidad superior de la barra de hierro un cilindro de cobre de 17 centímetros de altura y de 2 centímetros de diámetro, terminado por un cono de 3 centímetros de altura (fig. 1039). El conductor es una barra de hierro, que baja desde el pie del pararrayos hasta el suelo, en el cual penetra profundamente. Como las barras de hierro no pueden fácilmente, por causa de su rigidez, seguir los contornos de los edificios, es preferible formar el conductor con cuerdas de alambre de hierro, como las que se emplean en los puentes colgantes. La Academia de ciencias ha publicado, hace algunos años, un informe sobre los pararrayos, en el cual recomendaba emplear hilos de cobre rojo con preferencia a los alambres de hierro en la fabricación de las cuerdas destinadas a servir de conductor, pues el cobre rojo conduce la electricidad mejor que el hierro. Estas cuerdas deben tener 1 centímetro cuadrado de sección metálica, y los alambres de 1 milímetro a

1^{mm},5 de diámetro; pueden ser cuerdas de tres hilos como las cuerdas ordinarias. El mismo informe aconseja terminar la barra de los pararrayos en una punta de cobre rojo más bien que de platino, siempre por causa de la mayor conductibilidad.

El conductor se introduce ordinariamente en un pozo y para mejor establecer la comunicación con el suelo, se le termina en dos o tres ramificaciones. Si no hay pozo en las inmediaciones, se practica en el suelo un agujero de 4 a 6 metros de profundidad, y después de haber metido en él el pie del conductor, se acaba de llenar el agujero con brasa de panadero, que conduce bien.

Teoría. — La teoría de los pararrayos se funda en la electrización por influencia y en el poder de las puntas. Franklin admitía que las puntas de pararrayos roban a las nubes tempestuosas su electricidad; lo contrario es lo que ocurre. Cuando una nube tempestuosa, electrizada positivamente por ejemplo, se forma en la atmósfera, obra por influencia sobre la tierra, rechaza la electricidad positiva y atrae la negativa, que se acumula sobre los cuerpos colocados en la superficie del suelo, con tanta mayor abundancia cuanto más elevados se hallen. Los más altos son los que poseen entonces una tensión más considerable, y los que, por consiguiente, se encuentran más expuestos a la descarga eléctrica; pero si los cuerpos están armados de puntas metálicas como las varillas de los pararrayos, la electricidad negativa arrancada al suelo por la influencia de la nube, se pierde en la atmósfera y va a neutralizar la electricidad positiva de la nube. Por consiguiente, un pararrayos se opone no sólo a la acumulación de la electricidad en la superficie de la tierra, sino que también tiende a volver al estado neutro las nubes tempestuosas, doble efecto que tiene por objeto provenir la caída del rayo. Sin embargo, el desprendimiento de electricidad es a veces tan abundante, que el pararrayos no basta para descargar el suelo y la chispa salta, pero entonces el pararrayos es el que recibe

la descarga, por razón de su mayor conductibilidad y el edificio queda preservado.

La experiencia enseña que una barra o varilla de pararrayo protege a su alrededor un espacio circular de radio doble de su altura. En consecuencia, un edificio de 64 metros de longitud es preservado por dos pararrayos de 8 metros, colocados a la distancia de 32 metros.

Un pararrayo, para ser eficaz, debe satisfacer a las condiciones siguientes: 1º. La varilla debe ser bastante gruesa para que el rayo no la funda al atravesarla; 2º. debe terminar en punta para dar salida más fácilmente a la electricidad que se desprende del suelo; para satisfacer a esta condición se termina ordinariamente el pararrayo en una punta de platino o de cobre rojo dorado, a fin de evitar la oxidación; 3º. el conductor no debe presentar ninguna solución de continuidad desde la varilla hasta el suelo; 4º. la comunicación entre la varilla y el suelo debe ser lo más íntima posible; 5º. si el edificio que se protege contiene piezas metálicas de cierto tamaño, como una techumbre de zinc, canalones de metal, armazones de hierro, se debe poner todo eso en comunicación con el conductor del pararrayo.

Si las tres últimas condiciones no son satisfechas se estará expuesto a las *descargas laterales*, es decir, entre el conductor y el edificio, y entonces el pararrayo no hace más que aumentar el peligro. Hay que recordar que un pararrayo mal construido es más peligroso para un edificio que la carencia de pararrayo.

1067. Pararrayos Melsens. — Desde hace algunos años se construyen, con arreglo a las indicaciones de M. Melsens, de Bruselas, pararrayos mucho menos voluminosos que el de Franklin, menos costosos y que parecen por lo menos tan eficaces como éstos.

El pararrayo Melsens es una aplicación de un principio de electricidad estática demostrado antes; a saber, que en el interior de un cuerpo conductor que comunica con el suelo, no puede producirse ningún efecto de influencia electro-estática. Por consiguiente, se sustraerá del todo un edificio a la acción del rayo rodeándolo de una especie de enrejado metálico que comunique con el suelo. Se realiza eso haciendo pasar a lo largo de la cresta de los techos y de los ángulos de los muros conductores de hierro, enlazados unos con otros y puestos en comunicación con el suelo por un gran número de puntos. A ese sistema de preservación se añade el de Franklin. Para ello, se colocan en todas las intersecciones de los conductores manojos de puntas delgadas de cobre, que constituyen pequeños pararrayos de puntas múltiples, por donde la electricidad puede salir fácilmente al exterior. El Ayuntamiento de Bruselas, los mataderos de la Villette y el Hotel Sévigné, en París, están provistos de pararrayos Melsens. La figura 1040 representa una instalación de este género.

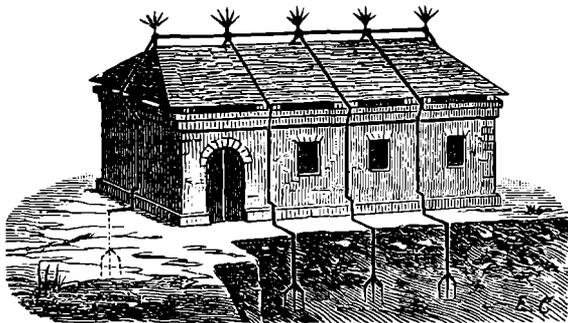


Fig. 1040.

1068. Aurora boreal. — Llámanse *aurora boreal* o *aurora polar* a un fenómeno luminoso notabilísimo que aparece frecuentemente en la atmósfera, en los dos polos terrestres. Si el fenómeno se produce en el polo norte, se denomina *aurora boreal*, y si en el sur, *aurora austral*. De numerosas observaciones llevadas a cabo en Melbourne y en el norte de Europa, parece deducirse que las auroras boreales y las australes son simultáneas.

Descripción *. — Por lo general, la aurora se compone de rayos más o menos anchos (fig. 1041) distribuidos generalmente en forma de abanico y dirigidos siguiendo las líneas de fuerza magnética (ley de Arago y de Wilke). En 1872, Laussedat comprobó claramente esta ley. Las bandas luminosas que constituyen la aurora son muy parecidas a rayos de proyectores. Detiéndense a cierta distancia del polo magnético y parecen apoyarse en un arco de círculo denominado *corona boreal* en cuyo interior no hay luz. La base de cada banda presenta en este arco un refuerzo notable. Al llegar hacia el ecuador los rayos se debilitan considerablemente. Por excepción se los ve ir de un polo a otro.

Los rayos de la aurora, que son de anchura muy variable, introdúcense a veces unos

* Sacamos la descripción de la aurora, del interesante trabajo de P. Villard (*Anales de Química y Física*, septiembre 1906).

en otros, presentando el aspecto de un cortinaje. Por momentos, prodúcense movimientos en la aurora; los rayos se mueven a lo largo de la corona boreal, y el conjunto gira. on un sentido o en otro, alrededor del eje magnético del globo. A veces, la base de los rayos sube o baja y ofrece la apariencia conocida con el nombre de *danza de los rayos*. El conjunto del meteoro constituye una banda luminosa de revolución alrededor del eje magnético del globo.

Explicación de la aurora polar. — Hasta estos últimos años, las teorías emitidas para explicar el fenómeno de las auroras polares no eran satisfactorias. Atribuíanse a corrientes eléctricas que circulaban en lo alto de la atmósfera. Después del descubrimiento

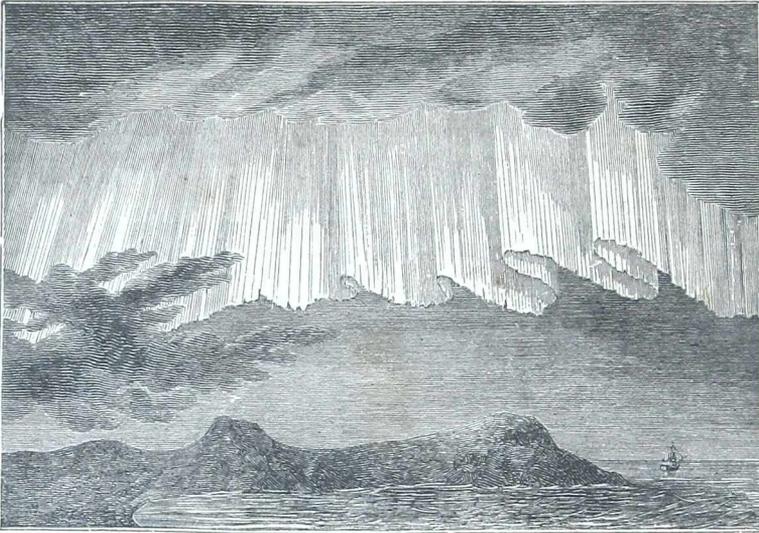


Fig. 1041.

de las radiaciones de la ampolla de Crookes, varios autores han considerado las auroras como debidas a los rayos catódicos. Birkeland ha desarrollado una teoría en que intervienen rayos catódicos particulares llamados *rayos magneto-catódicos* que se producen cuando se pone un tubo de Crookes en un campo magnético. Pero Villard ha demostrado que estos rayos deberían ir hasta el polo magnético, y no detenerse en la corona boreal. Por otra parte, la teoría de Birkeland no permite explicar la distribución en abanico regular, de los rayos boreales.

Villard ha demostrado que las auroras polares pueden explicarse por el enrollamiento de los rayos catódicos en el campo magnético terrestre, enrollamiento debido a las fuerzas electromagnéticas que experimentan estos rayos. Ha podido reproducir todas las particularidades de la aurora por medio de una gran ampolla de Crookes provista de un cátodo que sólo deja escapar un haz estrecho de rayos catódicos, y colocada en el campo de un electroimán poderoso. Variando el campo o el potencial de emisión de los rayos, obtiéndose a voluntad la rotación de la aurora artificial. Acercándole un pequeño vástago de hierro que deforme el campo, hace que los rayos próximos se agiten o se estrechen a capricho.

Cuanto al origen de los rayos catódicos puede explicarse por la presencia de un *cirro* formado por cristales de hielo que tengan por núcleos iones negativos. Buisson ha demostrado que los rayos ultravioletados descargan el hielo electrizado; de este modo se comprende que los rayos catódicos puedan nacer de la acción del sol sobre este cirro. También podría atribuirse, como lo atribuye Arrhenius, al efecto de partículas materiales rechazadas del sol por la presión de radiación o hacer intervenir, como ha propuesto Nordmann, el efecto de las ondas hertzianas emitidas por el sol. En fin, Vegard ha demostrado en 1911 que las particularidades de la aurora se explican mejor suponiendo que es producida por rayos positivos (rayos α) más bien que por rayos catódicos (rayos β).

METEOROS LUMINOSOS

1069. Arco iris. — El tan conocido fenómeno del arco iris, que se presenta a un observador que, vuelto de espaldas al sol, contempla una nube en el momento en que se

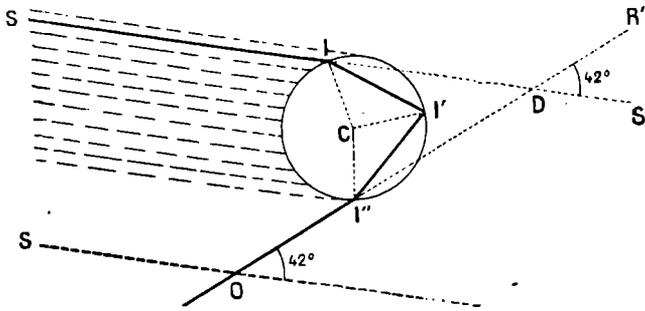


Fig. 1042.

resuelve en lluvia; débese a la dispersión de la luz en las gotas de agua de la nube. Consideremos todos los rayos que emanan de un punto del sol y que inciden en una

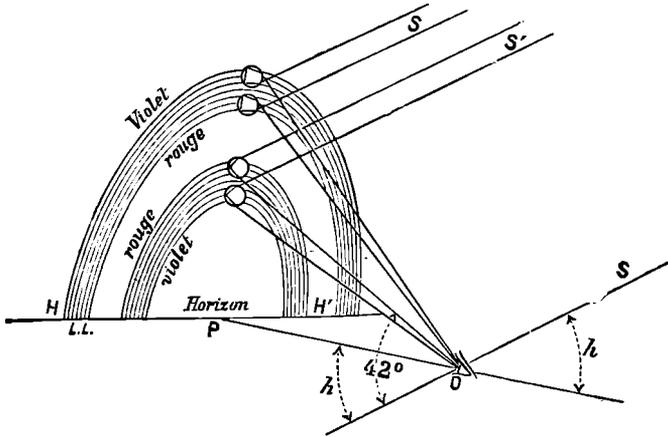


Fig. 1043.

gota de agua, Supongamos aisladas on estos rayos todas las radiaciones rojas y sigamos el recorrido de un rayo SI (fig. 1042). Este penetra en I aproximándose a la normal CI; en I', sale parte de la luz; otra parte sale y se refleja en I'', apartándose de la normal. Llamaremos desviación de este rayo al ángulo S'DO, Ahora bien, si consideramos todos los rayos paralelos a SI, la teoría demuestra que hay uno de ellos para el cual es mínima la desviación; el suplemento de esta desviación vale 42°. Como cerca del minimum varía lentamente la desviación, los rayos rojos incidentes próximos a SI sufrirán una desviación muy poco diferente y se dirigirán paralelamente. Estos son los rayos llamados eficaces. Los rayos incidentes algo más lejanos divergen a la salida. Si se coloca el ojo en O, en el trayecto de los rayos eficaces rojos, verá la gota teñida de rojo. Del mismo modo, todas las gotas de agua situadas en una recta que forme un ángulo de 42° con la línea OS (fig. 1043) que une el ojo del observador con el sol, se le antojarán rojas. Todas estas gotas están en la intersección de la nube con el cono que tiene por eje SO y por semiángulo

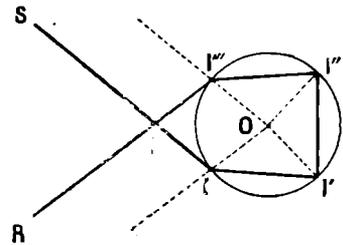


Fig. 1044.

en el vértice 42° . Y, como el sol no es un punto, en vez de ver una línea roja, se verá una banda roja.

Pero, se puede demostrar que, para los rayos violados, el suplemento de la desviación mínima es igual a $40^\circ 17'$. Por lo misma razón, el observador verá una banda violada que sigue la intersección de la nube con el cono de eje SO y cuyo semiángulo en el vértice es $40^\circ 17'$. Verá, pues un espectro impuro, de forma de arco de círculo y que tiene el violado en su interior.

A veces, se ve también otro arco iris mucho más palido, exterior al primero y cuyos colores se hallan colocados en sentido contrario. Débese a rayos tales como SI (fig. 1044) que sufren dos reflexiones interiores. La teoría indica otros arcos iris; no son visibles, porque las reflexiones interiores debilitan muchísimo la intensidad luminosa.

1070. Halos. — Los halos son círculos irisados que aparecen a veces alrededor del sol o de la luna y les son concéntricos (fig. 1045). El halo puede ser simple, es decir, for-

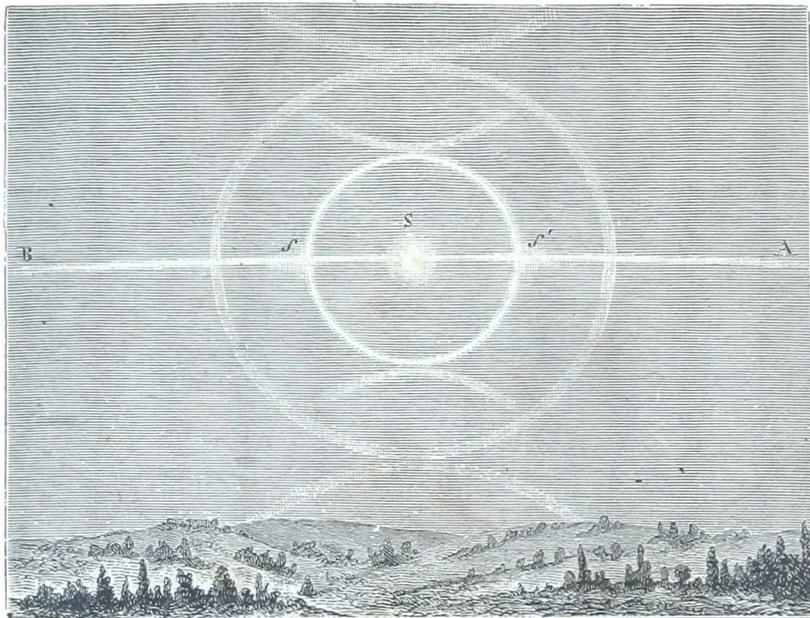


Fig. 1045.

mado por un solo círculo, o doble, esto es, formado por dos círculos. En ambos casos, la banda roja se halla dentro y la violada fuera, pálida y difusa. El semidiámetro aparente del halo pequeño es de 23° y el del grande, de 46° .

Los halos proceden de la descomposición de la luz solar a través de los pequeños prismas de hielo de que se componen algunas nubes.

1071. **Parhelios, círculos parhéllicos, coronas.** — Llámense *parhelios* o *falsos soles*, imágenes débiles del sol S, S' (fig. 1045) que aparecen en los extremos del diámetro horizontal del halo menor, algo hacia fuera. Los parhelios se explican admitiendo que como los prismas de hielo caen en el espacio en virtud de su peso, caen en mucho mayor número en la posición vertical, que presenta menos resistencia al aire, y que, por consiguiente, los rayos eficaces son mucho más abundantes en el plano horizontal que pasa por el centro del sol. De ahí nace el mayor brillo en los puntos en que el halo se halla cortado en dicho plano. También se producen parhelios en el halo exterior; pero mucho menos intensos.

El círculo parhéllico o *círculo blanco*, llamado así por no presentar ninguna coloración, es un círculo horizontal AB que pasa por el centro del sol. Su carencia de color demuestra que no se debe a un fenómeno de refracción, sino de reflexión en las caras de hielo.

Finalmente, llámense *coronas*, círculos concéntricos al sol o a la luna que aparecen cuando ante estos astros pasan nubes ligeras. Las coronas son en número de tres o cuatro, con el rojo en lo exterior y el violado en lo interior. El diámetro aparente de la menor es de 1 a 4 grados. Ya hemos visto la explicación de estos meteoros (676).

CAPÍTULO II

CLIMATOLOGÍA

1072. **Actinometría.** — El clima de un lugar depende de la cantidad de calor que el sol esparce en ese lugar, por unidad de superficie.

La *actinometría* tiene por objeto la determinación de esa cantidad de calor.

Constante solar. — Llámase *constante solar* la cantidad de calor que el sol envía normalmente por minuto a un centímetro cuadrado colocado en el límite de la atmósfera. Como no se puede pensar en medirla directamente, se ha tratado de determinarla por medidas efectuadas en la superficie de la tierra, con preferencia en lugares elevados. La cantidad de calor que ataca a un elemento de superficie, situado normalmente a los rayos, depende de la oblicuidad de estos rayos con relación a la vertical; porque, cuanto mayor es esta oblicuidad, más espesa es la capa de atmósfera que han tenido que atravesar los rayos. Conociendo la oblicuidad de los rayos, puede deducirse, por un cálculo no muy riguroso, de la medida de la cantidad de calor que cae en una porción de superficie al nivel del suelo, el valor de la constante solar.

Para efectuar esta medida, Pouillet determinaba la velocidad de calentamiento de un calorímetro llamado *pirheliómetro*.

Este método, que se hallaba sujeto a grandes causas de error, está ya abandonado. Úsase el método *actinométrico*, ideado por Saussure y perfeccionado sucesivamente por Herschell, Crova y Violle. Consiste en hacer incidir la radiación solar en un termómetro de mercurio, colocado en el centro de un recinto con temperatura constante, y en determinar el exceso de temperatura que el termómetro adquiere en el recinto. En el actinómetro de Violle (1046) realizase el recinto por una cámara esférica EE, de doble pared, en la cual circula agua a temperatura constante y conocida. Posee dos aberturas diametralmente opuestas, según las cuales orientase un haz de rayos solares SS. Estos rayos atacan un termómetro T de bola esférica ahumada, colocado en el interior de la cavidad. Antes de que penetren los rayos se nota el enfriamiento θ del termómetro en un minuto (negativo si el termómetro se calienta en vez de enfriarse). Se deja actuar los rayos solares durante un minuto y se nota el calentamiento Θ ; luego, cerrando la abertura, nótase el enfriamiento θ' en un minuto. Se admite que si no hubiese ocurrido ninguna irradiación del termómetro hacia el recinto, el calentamiento debido al sol hubiera sido $T = \Theta + \frac{\theta' + \theta}{2}$. Sea a la capacidad calorífica conocida del termómetro. La cantidad de calor que éste recibe en un minuto es $Q = aT$. Esta cantidad de calor es la que recibe una superficie igual a la superficie de un círculo máximo de la bola del termómetro. Por lo tanto, si llamamos R al radio de ésta, la cantidad de calor vertida en un minuto por unidad de superficie es $\frac{Q}{\pi R^2}$.

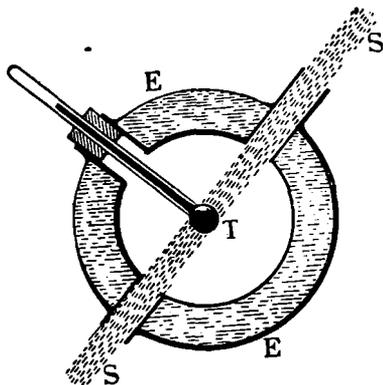


Fig. 1046.

Pirheliómetro compensador de Angström. — Este aparato, que sirve para las mismas indagaciones que el precedente, se compone de dos láminas de platino idénticas, muy delgadas y ennegrecidas. Una de ellas es calentada por el sol; la otra, por una corriente eléctrica cuya intensidad se regula de modo que las dos láminas tengan la misma temperatura. Se conoce la resistencia eléctrica de la lámina de platino calentada por la corriente y la intensidad de ésta. Por lo tanto, calculase fácilmente la cantidad de calor desprendida por la corriente en un tiempo dado. Es igual a la que el sol comunica, en el mismo espacio de tiempo, a la otra lámina.

Resultados. — Los resultados hallados son muy variables. Según Abbot y Fowle, la constante solar ha sido de 1,95 caloría por centímetro cuadrado y por minuto, en el período de 1905 a 1909.

Gran parte de la cantidad de calor que cae sobre la tierra es absorbida por la atmósfera. Esta parte es tanto mayor cuanto más húmeda está la atmósfera a causa del gran poder absorbente del vapor de agua.

1073. **Temperatura media.** — Se llama *temperatura media*, o sencillamente *temperatura de un día*, a la que se obtiene haciendo la suma de 24 observaciones termométricas tomadas sucesivamente de hora en hora, y dividiéndola por 24. La experiencia ha enseñado que se obtiene con mucha aproximación esa temperatura tomando la media entre las temperaturas máxima y mínima del día y de la noche, las cuales se determinan por medio de los termómetros de máxima y de mínima. Estos aparatos deben hallarse al abrigo de los rayos solares, elevados sobre el suelo, y alejados de todo cuerpo que pueda accionarlos por su irradiación.

La temperatura de un mes es la media de los treinta días, y la temperatura del año la media de la de los doce meses. En fin, la *temperatura de un lugar* es la media de su temperatura anual durante un gran número de años. En todos los casos, esas temperaturas son las del aire y no las del suelo.

La temperatura media verdadera de una región no puede determinarse con el termómetro colocado en una ventana ni dentro de una ciudad, según lo ha probado M. Renou. La de París es actualmente de 9°.9.

1074. **Causas que modifican la temperatura del aire.** — Las causas que hacen variar la temperatura del aire son principalmente la latitud, la altura, la dirección de los vientos y la proximidad de los mares.

1º *Influencia de la latitud.* — La influencia de la latitud resulta de la mayor o menor oblicuidad de los rayos solares; pues la cantidad de calor absorbida es tanto más grande cuanto más se acercan los rayos a la incidencia normal: de ahí resulta que el calor absorbido por el suelo decrece del ecuador hacia los polos; puesto que los rayos van haciéndose cada vez más oblicuos respecto del horizonte. Sin embargo, esta pérdida se halla compensada en parte, durante el verano, en las zonas templadas y glaciales por la prolongación de los días. Bajo el ecuador, donde la longitud de los días es constante, la temperatura es casi constante; en la latitud de París, y en las regiones más septentrionales, donde los días son muy desiguales, la temperatura varía mucho; pero en verano sube casi tanto como en el ecuador. Por lo demás, el descenso de la temperatura que resulta de la latitud es lento; así por ejemplo: en Francia hay que marchar 185 kilómetros hacia el norte para hallar un enfriamiento de un grado en la temperatura media del aire.

2º *Influencia de la altura.* — La altura, es decir, la elevación sobre el nivel del mar, imprime a la temperatura de la atmósfera un descenso mucho más rápido que el que resulta de la latitud. En efecto, en una ascensión al Monte Blanco, Saussure ha observado un descenso de temperatura de un grado para una altura de 144 metros, y de Humboldt, en el Chimborazo, halló disminución de 1 grado para 218 metros. Tomando la media entre esos dos números, resulta un enfriamiento de 1 grado para una altura de 181 metros, lo que da un descenso de temperatura casi mil veces más rápido para la altura que para la latitud.

La ley se modifica por efecto de las numerosas causas perturbadoras, como son los vientos reinantes, el grado de humedad, la hora del día, etc. La experiencia enseña que la diferencia de temperatura de dos lugares desigualmente elevados es sensiblemente proporcional a la diferencia de nivel, pero para distancias poco considerables. Se calcula por término medio el descenso de la temperatura del aire en 1 grado por 187 metros de elevación en la zona tórrida, y en 1 grado por 150 metros en la templada; pero esas cifras pueden variar mucho según las circunstancias locales.

El enfriamiento del aire, a medida que se sube, se le observa en las ascensiones aerostáticas: lo que también prueba ese hecho son las nieves perpetuas que cubren las cimas de las altas montañas. En los Alpes, el límite de las nieves persistentes se encuentra a la altura de 2710 metros; en Quito, bajo el ecuador, es de 4800 metros. Las causas de la baja temperatura que reina en las altas regiones de la atmósfera son: 1º el gran enrarecimiento del aire, que disminuye su poder absorbente; 2º la lejanía del suelo, que impide que éste caliente el aire por su contacto; 3º el gran poder diatérmico de los gases; 4º en fin, la disminución de presión, por efecto de la cual se dilata considerablemente el aire caliente que se eleva viniendo del suelo, y ya se ha visto que esta dilatación es una causa de frío intenso.

3º *Influencia de la dirección de los vientos.* — Como los vientos participan necesariamente de la temperatura de los países que han atravesado, su dirección, para un mismo lugar, tiene una gran influencia sobre la temperatura del aire. En París, el viento más caliente es el viento sur; en seguida vienen los vientos del sudeste, del sudoeste, del este,

del noroeste, del norte, y por último el del noreste, que es el más frío. Por lo demás el carácter de los vientos cambia con las estaciones : por ejemplo, el viento del este, que es frío en invierno, es templado en el estío.

4º. *Influencia de la proximidad de los mares.* — La proximidad de los mares tiende a elevar la temperatura del aire y a hacerla más uniforme. En efecto, se observa que, bajo los trópicos y en las regiones polares sobre todo, la temperatura de los mares es siempre más alta que la de la atmósfera. En cuanto a la uniformidad de la temperatura de los mares, la experiencia enseña que, en las regiones templadas, esto es, de 25 a 50º de latitud, la diferencia de temperatura entre el máximo y el mínimo de un día no



Fig. 1047.

pasa sobre las aguas de 2 a 3º, mientras que sobre los continentes esta diferencia puede llegar hasta 12 o 15º. En las islas, la uniformidad de temperatura es muy sensible, aun durante los fuertes calores. Penetrando en los continentes, los inviernos, dada igual latitud, se hacen más fríos, y la diferencia entre las temperaturas de los veranos y de los inviernos es mayor.

Este efecto de los mares proviene del mucho calor específico del agua, mediante el cual los mares absorben durante los calores del estío grandes cantidades de calor sin que aumente mucho la temperatura. Durante el invierno el agua restituye lentamente este calor. A esta causa de igualación de las temperaturas debe agregarse la evaporación de las aguas del mar, que por causa del gran calor de vaporización del agua, absorbe una cantidad considerable de calor, que luego es devuelto en los puntos del globo en que el vapor se condensa en agua.

5º *Influencia de las ciudades.* — La influencia de las ciudades modifica de una manera notable la media de las temperaturas; las mínimas son en ellas menos bajas y las máximas casi siempre más elevadas que en los campos. Así, hablando de París, donde se han hecho estudios acerca del particular, M. Angot ha observado entre las medias obtenidas en el Observatorio del parque Saint-Maur y las de la Oficina central meteorológica, una diferencia de 1º en 1889; 0º,96 en 1890 y 1º,05 en 1891. Para 1892, M. José Jaubert,

so llaman *polos del frío*, cuya temperatura media calculó Arago en -25° . Uno de esos polos se encuentra en América, cerca de las islas Parry, y el otro en Asia.

Las líneas isotérmicas del hemisferio sur son menos conocidas que las del hemisferio norte; la figura 1018 indica que su regularidad es mayor, lo que resulta de los vastos mares del hemisferio austral.

Por medio de las líneas isotérmicas es fácil seguir, en la superficie de la tierra, las zonas caracterizadas por el rigor o la benignidad de su temperatura media. Por ejemplo, la zona templada de $+10^{\circ}$ a $+15^{\circ}$, que en Europa está comprendida entre las latitudes de 50° a 42° , se halla situada en la América del Norte entre las latitudes mucho más meridionales de 40° a 36° . Por lo tanto, en igualdad de latitudes, el clima es mucho más benigno en Europa que en América.

1076. *Climas*. — Se comprende bajo el nombre general de *clima* el conjunto de las condiciones atmosféricas que caracterizan una región: la temperatura media anual, las temperaturas estival o invernal, la humedad del aire y del suelo, los vientos, la presión atmosférica, la pureza del cielo. Clasificados con arreglo a su temperatura media anual, los climas se dividen en siete principales: 1° *clima ardiente* de $27^{\circ},5$ a 25° ; — 2° *clima cálido*, de 25° a 20° ; — 3° *clima suave*, de 20° a 15° ; — 4° *clima templado*, de 15° a 10° ; — 5° *clima frío*, de 10° a 5° ; — 6° *clima muy frío*, de 5° a cero; — 7° *clima glacial*, por bajo de cero.

Estos climas se dividen a su vez en *climas constantes*, en los que la diferencia de temperatura entre el invierno y el verano no pasa de 6° a 8° ; en *climas variables*, en los cuales esa misma diferencia se eleva de 16° a 20° ; y en *climas excesivos*, donde esa diferencia pasa de 30° . Los climas de París y de Londres son variables; los de Pekín y de Nueva York, excesivos. Los climas de las islas son en general poco variables, porque la temperatura del mar es casi constante; de ahí también la distinción en *climas marinos* y en *climas continentales*. El carácter de los climas marinos es que la diferencia de temperatura entre el verano y el invierno es siempre mucho menor que en los climas continentales. Por lo demás, como se ha visto anteriormente, la temperatura más o menos elevada no es el único carácter que determina los climas; también se diferencian por la humedad del aire, la cantidad y la frecuencia de las lluvias, el número de las tempestades, la dirección e intensidad de los vientos, y en fin por la naturaleza del suelo. Estas causas reunidas hacen que el estudio de los climas o *climatología*, sea aún una ciencia bastante difícil.

1077. *Distribución de la temperatura en la superficie del globo*. — La temperatura del aire en la superficie del globo va decreciendo del ecuador hacia los polos; pero está sometida a otras causas perturbadoras que dependen de la distribución complicada de las tierras y los mares. Hasta ahora lo único que se ha podido hacer, por medio de observaciones numerosas, es determinar la temperatura media de cada lugar.

Temperaturas medias en diversas latitudes.

Ecuador	26°,5	Marsella	14°,1
Cayena	26°,4	Ginebra	9°,2
San Luis (Senegal)	23°,2	París	9°,0
Biskra	21°,5	Neele (Bruselas)	3°,7
Argel	17°,0	Cabo Norte	0
Buenos Aires	15°,1	Isla Melville	— 18°,7

Estas son las temperaturas medias. Las cifras siguientes demuestran que difieren mucho de las temperaturas máxima y mínima que se producen en ciertos lugares. En efecto, la más alta temperatura que Griffiths observó con certeza en la superficie del globo fué 55° cerca del Eufrates; la más baja fué -72° en Verkhojansk, en la Siberia oriental; lo cual da una diferencia de 127 grados entre las temperaturas extremas observadas en diferentes puntos del globo terrestre.

Las temperaturas extremas observadas en París son $-25^{\circ},6$, minimum observado el 10 de diciembre de 1879 y $+38^{\circ},4$ maximum observado el 19 de julio de 1881.

1078. *Temperatura de los mares, corrientes marinas*. — La temperatura del mar entre los trópicos es generalmente en la superficie casi la misma que la del aire; en las regiones polares el mar está siempre más caliente que la atmósfera.

La temperatura del mar, en la zona tórrida, es constantemente de 26° a 27° , en la superficie; cuando la profundidad aumenta, disminuye, y en las regiones templadas la temperatura del mar a grandes profundidades se mantiene entre $1^{\circ},7$ y $3^{\circ},5$. Se explica la baja temperatura de las capas inferiores por efecto de las corrientes submarinas que llevan hacia el ecuador el agua fría de los mares polares, mientras que otras corrientes

calientes, dirigiéndose desde el ecuador hacia los polos, atenúan la intensidad del frío en esas latitudes elevadas.

La más importante de las corrientes marinas es la *Gulf Stream* (Corriente del golfo) descubierta por Maury. El camino total que recorre esa corriente, contando la ida y la vuelta, es de unos 28 000 kilómetros, y su anchura alcanza en algunas partes hasta varios centenares de leguas. Los navegantes la reconocen fácilmente en su temperatura, que se eleva hasta 22° y 27°. Atravesando el Atlántico del este al oeste, alcanza el cabo San Roque al norte del Brasil, sigue las costas de la América del sur hasta el golfo de México, de donde sale para dirigirse hacia el norte. Al llegar al banco de Terranova, se bifurca en dos corrientes secundarias, una de las cuales sube hasta Islandia y Noruega, para ir a perderse en el mar Glacial; mientras que la otra, volviendo hacia el sur, llega al golfo de Gascuña y vuelve hacia el trópico, siguiendo las costas occidentales de África.

En el Océano Pacífico existe también una gran corriente marina, que se dirige desde el golfo de Bengala hacia el estrecho de Behring. Todas esas corrientes tienen por causa la diferencia de temperatura, y por consiguiente, de densidad entre las aguas calientes del mar bajo los trópicos y las aguas frías de los mares glaciales, y también la dirección de los vientos y la configuración de las costas y de los fondos submarinos.

Teniendo en cuenta las enormes presiones que se ejercen en los mares profundos, se creía que la vida animal no podía existir en ellos; pero la sonda ha traído a la superficie gran número de seres de orden inferior, admirables por sus formas y sus colores, y dotados casi todos de una fosforescencia deslumbradora, como para suplir a la luz del día.

1079. *Temperatura de los lagos y manantiales.* — La temperatura de los lagos presenta variaciones mucho más grandes que la de los mares; su superficie, que puede congelarse durante el invierno, se calienta en verano hasta 20° a 25°. El fondo, por el contrario, conserva sensiblemente una temperatura de 4°, que es la del *máximum* de densidad del agua.

Los manantiales, procedentes de las aguas de lluvia que se han infiltrado en la costra terrestre hasta profundidades más o menos considerables, tienden necesariamente a ponerse en equilibrio de temperatura con las capas terrestres que atraviesan. Por consiguiente, cuando llegan a la superficie del suelo, su temperatura depende de la profundidad que han alcanzado; si esta profundidad es la de la capa invariable, la temperatura de las fuentes es de 11° a 12° en los climas templados, pues esa es en ellos la temperatura de dicha capa, y también con corta diferencia, la temperatura media anual. Sin embargo, si el manantial es poco abundante, su temperatura es elevada en estío y fría en invierno por la influencia de las capas que atraviesa para llegar desde la capa invariable hasta la superficie del suelo. Pero si aquéllos vienen de una profundidad mayor que la a que se encuentra la capa invariable, su temperatura puede ser mucho más elevada que la temperatura media del lugar, y en ese caso se llaman *aguas termales*. He aquí la temperatura de algunas aguas termales.

En Francia.	Vichy	40°
—	Mont-Dore	44°
—	Bourbonne	50°
—	Dax (Landas)	60°
—	Chaudes-Aigues	88°
En América.	Trincheras, cerca de Puerto Cabello	97°
En Islandia.	El Gran Geysir a 20 metros de profundidad.	124°

Las aguas termales adquieren, por efecto de su alta temperatura, la propiedad de disolver algunas de las sustancias minerales que encuentran a su paso, y entonces se las llama *aguas minerales*. Las sustancias que contienen en disolución son generalmente los ácidos sulfuroso, sulfhídrico, clorhídrico, sulfúrico, y también sulfuros, hiposulfitos, sulfatos, carbonatos, cloruros y yoduros.

La temperatura de las aguas termales no es modificada, en general, por la abundancia de las lluvias o por las sequías; pero lo es por los temblores de tierra, después de los cuales se la ha visto unas veces disminuir y otras crecer.

1080. *Distribución de las aguas en la superficie del globo.* — La distribución de las aguas en la superficie del globo ejerce una gran influencia sobre los climas. Las aguas presentan una superficie mucho mayor que la de los continentes y su distribución es muy desigual en los dos hemisferios. La superficie del globo, en miriámetros cuadrados, es de 5 100 000; de ellos los lagos y los mares ocupan 3 700 000 miriámetros cuadrados, quedando 1 400 000 para los continentes y las islas; es decir, que la superficie de las aguas es unas tres veces mayor que la superficie de las tierras. En el hemis-

ferio austral, la superficie de los mares es mayor que en el hemisferio boreal en la proporción de 13' a 9

La profundidad de los mares varia mucho. La sonda encuentra el fondo, en general, a 300 o 400 metros; pero en alta mar baja hasta 9 000 metros, que es la mayor profundidad observada. Según esos números, la masa total de las aguas, en la superficie del globo, no es superior a la de una capa líquida que tuviese 1 000 metros de altura y que envolviese toda la tierra.

CAPÍTULO III

PREVISIÓN DEL TIEMPO

1031. **Noticia histórica.** — Desde fines del siglo XVIII, Borda, Lavoisier y Laplace entreveron la posibilidad de prever el tiempo en breve plazo por la observación de los fenómenos meteorológicos. Más tarde, Lamark logró que funcionasen algunas estaciones durante cierto número de años, y aun había concebido el proyecto de instalar un observatorio en la cima del Puy de Dome.

Pero sólo a mediados del siglo XIX fué cuando Maury, Fitz Roy, Buys Ballot, etc., dieron un gran impulso a los estudios meteorológicos y Leverrier organizó en Francia un servicio internacional que se desarrolló poco a poco y dió magníficos resultados gracias a los trabajos de Marié-Davy, Sorel y Fron. En varios países, principalmente en los Estados Unidos, se crearon pronto servicios análogos que hicieron progresar rápidamente nuestros conocimientos en meteorología.

1082. **Elementos meteorológicos.** — Los principales elementos meteorológicos que pueden servir muy bien para la previsión del tiempo son el viento o la marcha de las nubes, la altura barométrica, la temperatura del aire, su estado higrométrico, el estado del cielo y ciertos datos suministrados por la brújula y el espectroscopio.

Los más importantes son la marcha de las nubes y las variaciones barométricas. Ya hemos indicado cómo se observa un barómetro. En cuanto a la determinación de la marcha de las nubes, es muy fácil para el que tiene cierta práctica. Es indispensable que el observador tenga fija la cabeza para evitar la ilusión de los movimientos relativos y que escoja una señal fija situada en la dirección del rayo visual que va hasta la nube que se observa: la esquina de una casa, las ramas de un árbol, las rejas de un balcón, etc. — Los observadores meteorológicos se sirven de aparatos especiales, tales como el *nefoscopio*, el *rastrillo* o *rejilla nefoscópica*, inventados por Besson.

Para el estudio serio de los diferentes elementos meteorológicos, un observador aislado puede llegar a formular buenas previsiones del tiempo. Pero este medio entraña siempre mucha indecisión y frecuentes desengaños ateniéndose solo a eso. Por esta razón conviene tener en cuenta los preciosos recursos que ha suministrado hace cuarenta años, el método de las observaciones simultáneas, que vamos a exponer.

1083. **Depresiones o Areas de bajas presiones.** — Actualmente, la base de las previsiones del tiempo la suministra en los observatorios el estudio de los grandes torbellinos atmosféricos de 100, 1 000, 2 000 kilómetros de diámetro, a los que se ha dado el nombre de *depresiones* o *áreas de bajas presiones*, porque el barómetro está ahí más bajo que en las inmediaciones, y tanto más bajo cuanto más cerca está del centro tormentoso.

Las depresiones se suceden rápidamente en ciertas regiones atmosféricas. Mientras que el aire gira en torno del minimum de presión acercándose a él más y más, el centro del torbellino cambia de sitio con una velocidad variable arrastrando sin cesar nuevas masas de aire.

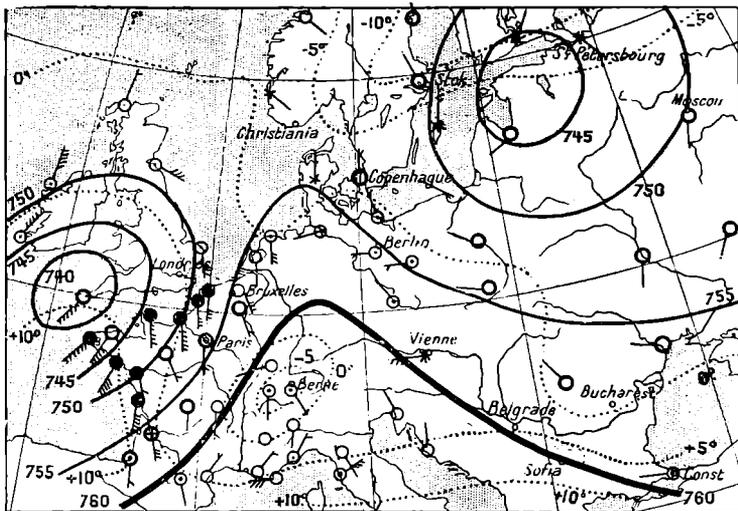
Depresiones hay que permanecen casi estacionarias días enteros y que de repente cambian de lugar recorriendo trescientas o cuatrocientas leguas en veinticuatro horas: — otras marchan regularmente avanzando sólo cuarenta o cincuenta leguas por día; — otras, en fin, después de seguir una dirección, se paran bruscamente y se desvanecen, o también retroceden con la misma velocidad.

Las figuras 1049 y 1050 representan la marcha de una depresión durante el espacio de un día. La figura 1049 indica las líneas de igual presión o *isobáricas*, así como la

repartición de las presiones y de las temperaturas, la dirección de los vientos y el estado del cielo en Europa el 12 de diciembre de 1901 a las 7 de la mañana. La figura 1050 da los mismos elementos a las 6 de la tarde de ese mismo día.

Estos movimientos gigantescos del aire son la causa secundaria de todos los cambios de tiempo y distribuyen en la superficie de la tierra la lluvia o el buen tiempo, la calma o la tempestad, el calor o el frío con los nublados o los hielos. Cuando faltan estas depresiones (régimen anticiclónico), reina la sequía con calor excesivo en verano y frío extremado en invierno.

1084. **Repartición de los meteoros en una depresión** — La producción de los diferentes meteoros en los países que están bajo la influencia de una depresión, está sujeta a reglas que en totalidad no son absolutas, pero que tienen al menos mucho carácter de generalidad. Ante todo, en toda depresión del hemisferio boreal, el aire atmosférico se



Signos convencionales.

Cielo	Viento	Curvas
<ul style="list-style-type: none"> ○ Sereno. ⊙ Nublado. ◐ Cubierto. ● Lluvia. * Nieve. ○ Niebla. 	<ul style="list-style-type: none"> → Suave. →→ Fuerte. →→→ Muy fuerte. →→→→ Tempestad. 	<ul style="list-style-type: none"> Isobárica. ——— Isotermas. ——— ○ Ciudades.

Fig. 1049.

mueve en torbellino dejando a su izquierda el centro de depresión. De este modo los países que están al Sur del centro tienen vientos del Oeste; los que están al Este, vientos del Sur; los que están al Norte, vientos del Este, y los que están al Oeste, vientos del Norte.

Por el contrario, en toda depresión del hemisferio austral, el aire atmosférico se mueve en torbellino dejando a su derecha el centro de depresión. Por eso los países que están al Sur del centro tienen vientos del Este; los que están al Este, vientos del Norte; los que están al Norte, vientos del Oeste, y los que están al Oeste, vientos del Sur.

Esta es una ley invariable creada por la rotación de la tierra y por el movimiento general, que, por la acción del calor solar, lleva el aire atmosférico del ecuador a los polos: designásele generalmente con el nombre de ley de Buys Ballot.

Además, los diferentes meteoros ordinarios se reparten en las diversas partes de la depresión según la temperatura, la presión atmosférica y el viento, que son los tres factores principales de los cambios de tiempo.

En nuestro hemisferio, el mal tiempo común, viento y lluvia, reina sobre todo en la mitad sur de las depresiones, en tanto que en su parte norte hace buen tiempo, y enteramente buen tiempo hacia su borde extremo septentrional, así como fuera de toda

depresión. El calor es más fuerte en el hemisiciclo oriental de las depresiones que en el occidental, donde nieva con frecuencia en invierno. — Las tempestades ocurren principalmente en su cuarto sudeste y las heladas primaverales en la zona noroeste, etc.

1085. **Trayectorias ordinarias de las depresiones.** — La previsión del tiempo consiste, pues, en descubrir la existencia y la posición de las depresiones, en pronosticar su marcha futura conforme a otros casos anteriores y a los indicios actuales, o en seguir su movimiento sin perderle de vista.

La mayor parte de las depresiones atmosféricas observadas en Europa vienen ya formadas del océano Atlántico, habiendo atravesado ya algunas de ellas la América del Norte. Generalmente llegan a nuestro continente a la latitud de las Islas Británicas, luego pasan sucesivamente al mar del Norte y los Países Bajos, a la Escandinavia y Dinamarca, al mar Báltico y norte de la Rusia, de tal modo que sus centros recorren

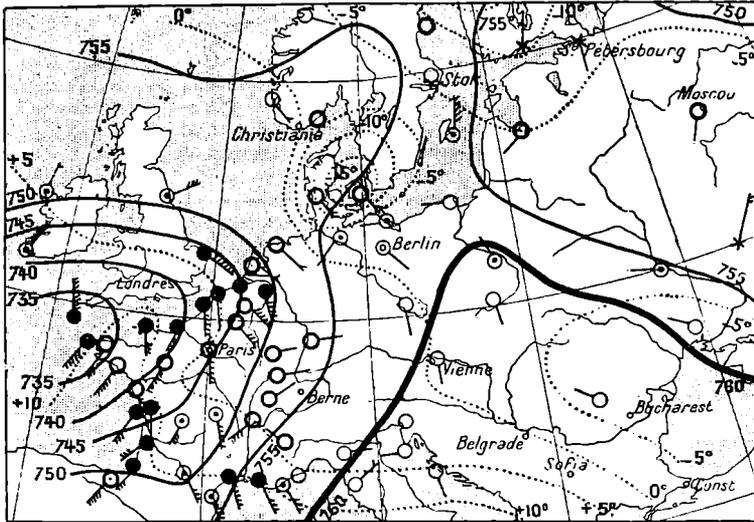


Fig. 1050.

trayectorias orientadas generalmente del Oeste-Sudoeste al Este-Nordeste, o del Sudoeste al Nordeste.

Hay otras que vienen del Atlántico septentrional y atraviesan la Inglaterra o el mar del Norte, los Países Bajos y la Europa central y van a perderse en el Mediterráneo. Hay otras que se presentan hacia las costas de Francia y de allí pasan a Alemania y Rusia. Por fin, otras llegan por las islas Azores, atraviesan Marruecos y España, y luego Argelia y la región del Mediterráneo; o, a veces, remontan hacia el Norte, sin tocar Portugal ni Francia, y después desaparecen hacia las altas latitudes.

En cuanto a las depresiones que tienen origen en Europa, casi siempre son secundarias, satélites de las principales, o bien se forman hacia los Pirineos, el golfo de Gascuña o el de León, pero sobre todo al sur de los Alpes, entre la Cerdeña y la cadena alpina. La frecuencia de las depresiones en esta región importante es bastante grande para que la carta de las presiones barométricas en Europa presente un *mínimum* muy notable.

Estas últimas depresiones, cuyo origen proviene de la configuración del macizo de los Alpes, se desarrollan generalmente allí mismo y permanecen estacionarias uno o dos días; después se alejan en dirección del Sudeste, extendiendo poco o poco su influencia por toda la región del Mediterráneo.

Las depresiones del golfo de Gascuña permanecen también algunas veces estacionarias en el primer periodo de su desarrollo y en seguida atraviesan la Francia del Sudoeste al Nordeste, sobre todo en verano, en cuya época son causa de terribles tempestades; pero lo más común es que atraviesen el istmo pirenaico y lleguen en menos de veinticuatro horas al golfo de Génova, y al llegar aquí obran como las depresiones formadas en el sur de los Alpes.

Por fin, algunas depresiones venidas del continente africano se establecen, en raras épocas, en el Mediterráneo occidental, de tal modo que su centro se halla generalmente

al sur de los Alpes, lo mismo que las precedentes. Aquí permanecen uno o dos días y después, obediendo a la ley común, se disipan lentamente, desapareciendo por Italia, Turquía, Grecia y Egipto.

Hay depresiones que, accidentalmente, pueden atravesar nuestro continente en todos sentidos; pero nunca marchan por decirlo así del Nordeste al Sudoeste, del Este al Oeste, o del Sudeste al Noroeste.

1086. **Determinación de las depresiones.** — Los observatorios meteorológicos determinan la posición y la importancia de las depresiones trazando cada día, o dos veces al día, una *carta de las depresiones*, mediante observaciones efectuadas en vastísima extensión de país y luego se centralizan rápidamente por medio de despachos telegráficos. Pero este método no está al alcance de todos.

Se le puede reemplazar, en cierta medida, por la atenta observación del barómetro, así como por la del viento, o mejor aún por la marcha de las nubes. — En primer lugar, conforme a la regla de Buys Ballot, los vientos del Oeste indican que hay un centro de depresión en la dirección del Norte; — otros vientos del sur prueban que hay otro centro en el Oeste, etc. En segundo lugar, la depresión es tanto más importante para el punto de observación, cuanto más bajo está el barómetro, y cuanto más fuerte es el viento, o mayor la velocidad de las nubes. Si el descenso barométrico ha sido lento y considerable, el aire de las bajas presiones tiene vasta extensión, mientras que ésta es muy limitada si el barómetro ha bajado poco y pronto. Además el centro de depresión se acerca o aumenta en importancia cuando el barómetro baja; se aleja o pierde en importancia cuando el barómetro sube, y se halla más cerca en el momento del *mínimum* barométrico. En fin fácil es conocer de qué lado llega la depresión o desaparece, puesto que la dirección en que se halla su centro está siempre indicada de manera bastante exacta por la perpendicular al sentido de la marcha de las nubes.

1087. **Interpretación de las variaciones barométricas y de los vientos locales.** — **Método de Guilbert.** — El estudio de las variaciones barométricas locales sirve para aumentar el valor de las previsiones del tiempo y cuando se llega uno a familiarizar con los diversos aspectos que toman estas variaciones, se conoce:

1º. Que el descenso del barómetro anuncia, al principio, buen tiempo, y luego mal tiempo;

2º. Que la subida del barómetro coincide con el mal tiempo, y anuncia luego el buen tiempo.

Un descenso lento, regular y moderado del barómetro (3 a 4 milímetros en 24 horas) indica que pasa a lo lejos una depresión; pero sin causar un cambio notable del tiempo.

Un descenso repentino, aun cuando sea pequeño (3 a 4 milímetros en 2 o 3 horas) significa siempre que hay una perturbación atmosférica en las inmediaciones, ocasionando generalmente ráfagas y chaparrones pasajeros. Cuando es considerable (8 a 10 milímetros en cinco o seis horas) pronostica una tempestad.

Un fuerte descenso, lento y continuo, induce a prever, para larga duración, malos tiempos, que serán tanto más sensibles cuanto más haya bajado el barómetro de mucha altura.

Si sobreviene una elevación rápida cuando el barómetro está bajo, es anuncio de buen tiempo, pero poco durable; más si la elevación es considerable y prolongada, se puede pronosticar muchos días de buen tiempo.

En general, el barómetro tiende a subir de las cuatro a las diez de la mañana; mientras que baja ordinariamente de las doce a las tres de la tarde. Esta variación diurna, que proviene de la acción cotidiana del calor que radia el sol, debe tenerse en cuenta en los largos periodos de bueno o mal tiempo. Si la elevación barométrica de la mañana no se produce, y sobre todo si es reemplazada por un descenso, se puede deducir que éste se acentuará sin falta por la tarde, siendo así más que probable el mal tiempo. Si, por el contrario, en una serie de mal tiempo no se observa el descenso de por la tarde, y, con más razón, si este descenso es reemplazado por una elevación, se deducirá que esta continuará y aumentarán, por consiguiente, las probabilidades de mejoría del tiempo.

El método Guilbert. — Como acabamos de ver en este resumen de los conocimientos meteorológicos actuales, todas las modificaciones del tiempo son producidas por las variaciones barométricas.

Luego la causa inmediata del bueno o el mal tiempo está incontestablemente en la presión atmosférica y, por consiguiente, si se quiere llegar a una previsión racional de los diversos fenómenos meteorológicos, es preciso ante todo determinar la causa que los produce, es decir el sentido y el alcance de las futuras variaciones de la presión.

Ahora bien, según todos los autores, no hay nada más instable que la presión barométrica. Las depresiones o ciclones, esos factores tan importantes del estado del cielo,

siguen una marcha caprichosa, con una velocidad variable y una existencia, a veces prolongada, a veces efímera, pero siempre determinadas. Hasta estos últimos días las oscilaciones de la presión atmosférica habían desafiado toda previsión.

El distinguido meteorologista M. Guilbert se ha propuesto llenar este vacío. Sus investigaciones le han demostrado que existe una relación de causa y efecto entre los vientos (fuerza y dirección) y la variación consecutiva de la presión. De aquí resulta que la sola observación de los vientos de superficie en las cartas isobáricas permite prever, con 24 horas de anticipación, no sólo la mayor parte de las variaciones barométricas, sino también el *porvenir* de los ciclones o anticiclones.

Guilbert ha establecido diversos principios y de ahí ha deducido cierto número de reglas prácticas que forman un « nuevo método de previsión del tiempo ».

He aquí una breve exposición :

Los vientos se clasifican en dos categorías, en cuanto a la *velocidad* y en cuanto a la *dirección*.

En cuanto a la velocidad o fuerza, se distinguen los vientos en normales y anormales.

El viento *normal* es aquel cuya velocidad es proporcional al gradiente barométrico*.

Pero todo viento puede ser de velocidad superior o inferior a la normal : luego habrá vientos anormales *par exceso* y anormales *por defecto*.

En cuanto a la dirección, los vientos se dividen en *convergentes* o centrípetos, y *divergentes* o centrífugos.

Primer principio : Todo viento anormal por exceso determinará un alza barométrica en las 24 horas.

Inversamente, el viento normal por defecto causará una baja de barómetro.

Segundo principio : Los vientos convergentes y en exceso aumentarán la presión *hacia su izquierda* y en una dirección normal a las isobáricas.

Inversamente, todo viento divergente o centrífugo es causa de baja barométrica.

Por consiguiente, un ciclón rodeado por todas partes de vientos convergentes y en exceso será colmado o destruido en las 24 horas, mientras que, al contrario, vientos divergentes, cerca de un centro ciclónico, determinarán su pronta agravación y, a la vez, permitirán fijar su trayectoria.

Todos estos principios han sido probados por la experiencia, especialmente en el *Concurso Internacional de previsión del tiempo* en Lieja, en 1905, en el que Brunhes y Teisserenc de Bort formaban parte del jurado que concedió el premio a Guilbert.

Desde entonces, el nuevo método se estudia en todos los Institutos meteorológicos, y es aplicado en el Extranjero, especialmente en Hamburgo, por Grossmann, en Bilt (Holanda), por Gallé, y en Valencia (España) por Benedito.

1088. **La protección de las cosechas y la lucha contra los meteoros.** — La previsión del tiempo interesa a todos por muchos conceptos; pero al comercio, a la industria y a la agricultura sobre todo es a los que prestará mayores servicios tan pronto como se puedan enviar a las poblaciones agrícolas avisos precisos de los observatorios regionales. Los labradores están tan persuadidos, que ya no se contentan con aguardar con paciencia los avisos meteorológicos y tomar ciertas precauciones más o menos prácticas para librar sus cosechas de tempestades, heladas, sequías, granizos, etc.; sino que han emprendido directamente la lucha contra estos desastrosos meteoros y contra las mismas causas que los producen.

En América se ha tratado ante todo de librarse de las sequías, provocando la lluvia por frecuentes detonaciones. Los resultados no han sido satisfactorios, y esto se explica fácilmente, porque el aire atmosférico contiene, durante las sequías, muy poco vapor de agua, y antes es preciso saturarle para lograrlo.

* El gradiente barométrico mide la magnitud de las diferencias de presión entre los puntos de una región en un momento dado. He aquí como se define. Supongamos que desde un punto nos desviamos cierta distancia en una dirección perpendicular a las líneas isobáricas; sea l el valor de esta distancia, evaluada tomando como unidad la longitud de un grado de meridiano (se obtiene l sacando el cociente de la distancia, expresada en kilómetros, por 111, porque 111 km. es la longitud del grado en un meridiano); sea, además, ΔH la variación de la presión observada. El gradiente barométrico es el cociente $\frac{\Delta H}{l}$.

Se puede medir el gradiente en una carta meteorológica midiendo, con un decímetro, la distancia entre dos isobáricas contiguas; la escala de la carta permite obtener l por un cálculo sencillo, ΔH es la diferencia de las presiones que corresponden a las isobáricas.

Hace algunos años que con el fin de proteger los viñedos se ha tratado, primero en Estiria y luego en Italia y Francia, de destruir los nublados y suprimir las granizadas con cañones que lanzan verticalmente al aire un proyectil gaseoso anular, que sube hasta 400 metros girando sobre sí mismo. Casi todos los experimentadores afirmaron que este procedimiento tenía mucha eficacia y, a pesar de las reservas de ciertos hombres de ciencia, provocaron un entusiasmo que se extendió aumentando continuamente.

En 1900 había ya en la Italia septentrional 15 000 estaciones de tiro, agrupadas por sindicatos a 500 metros unas de otras, y en Francia, en el Beaujolais, se llegaron a disparar en 1901, 20 000 cañonazos contra un solo nublado. Después se ha sustituido el cañón paraganizo por cohetes lanzados al aire.

Pero la eficacia de estos procedimientos ha sido puesta en duda. En Lyon, en el Congreso Internacional de defensa contra el granizo, que se celebró a fines de 1901, M. Plumandon, informante general, ha concluido que se había hecho mal en atribuir a la acción de los cañones la mayor parte de los resultados invocados para dejar bien sentada la eficacia del cañoneo.

Asimismo, en 1910, André demostró también la ineficacia de los disparos contra el granizo. Pero, poco tiempo después, Violle señalaba que, en el Beaujolais, el total de las pérdidas por causa del granizo, de 1901 a 1909, sólo había ascendido a 1 700 000 francos, mientras que llegaba a 13 millones durante los diez años precedentes, cuando no se hacían esos disparos. Sería imprudente sacar de estas cifras una consecuencia formal; pero pueden ser un aliciente para continuar los experimentos.

Por otra parte, Beauchamp y Négrier han tratado de impedir que el granizo caiga en una vasta región, descargando las nubes tempestuosas por medio de pararrayos perfeccionados (*Niagara eléctrico*), dispuestos en líneas que intercepten el camino ordinario de los nublados. Como hace pocos años que se han aplicado estos aparatos, no se puede emitir un juicio definitivo acerca de su eficacia.

LIBRO XIV

COMPLEMENTOS Y PROBLEMAS DE FÍSICA

CAPÍTULO I

CAMBIOS DE UNIDADES

1089. Variaciones del número que representa una magnitud dada cuando se cambia la unidad que sirve para medir esta magnitud. — El número que mide una magnitud dada depende, no sólo de esta magnitud, sino también de la unidad elegida. Por ejemplo, supongamos una longitud AB (fig. 2) representada por el número l cuando se emplea la unidad PQ. Tomemos una nueva unidad de longitud P'Q' [L] veces menor que PQ. Como AB contiene l veces a la longitud PQ, contendrá evidentemente l [L] veces a la longitud P'Q'; puesto que P'Q' está contenido [L] veces en PQ. El número l' que mide la longitud AB cuando se toma a P'Q' como unidad, está pues ligado al número l , que mide la misma longitud cuando se toma PQ por unidad, por la relación

$$l' = l [L],$$

en la que [L] representa la medida de la primera unidad PQ por medio de la segunda, P'Q'.

Lo que acabamos de decir se extiende a una magnitud cualquiera. Sea n el número que representa una magnitud dada cuando se toma cierta unidad. Escojamos una segunda unidad, y sea [K] la medida de la primera unidad por medio de la segunda. La primera contiene, pues, [K] veces a la segunda. Por consiguiente, la magnitud medida, que contiene n veces la primera unidad, contiene n (K) veces la segunda. Por lo tanto, se mide mediante esta segunda unidad, por el número

$$n' = n [K].$$

En general, llamaremos *factor de conversión para un cambio dado de unidad*, al número [K] que mide la primera unidad por medio de la segunda.

La medida de una magnitud dada, por medio de la segunda unidad, se obtiene multiplicando el número n que mide esta magnitud con la primera unidad, por el factor de conversión [K].

EJEMPLO. — Supongamos una longitud AB (fig. 2) medida por el número 5, cuando se toma PQ por unidad. Tomemos una nueva unidad P'Q' contenida 2 veces en PQ. El factor de conversión [L] relativo a este cambio de unidad es igual a 2. La medida de la longitud AB con la nueva unidad será, por consiguiente :

$$l' = 5 \times 2 = 10.$$

1090. Aplicación a los sistemas de unidades racionales. — Cambio de unidades fundamentales. — Cuando se cambian las unidades fundamentales en un sistema de unidades racionales, las unidades derivadas cambian al mismo tiempo; puesto que sus definiciones están relacionadas con las de las unidades fundamentales.

Luego deberemos resolver el siguiente problema general :

Conociendo los factores de conversión relativos a las unidades fundamentales, hallar e factor de conversión relativo a una unidad derivada cualquiera.

1091. **Superficie y volumen.** — Las únicas magnitudes que intervienen en geometría son las longitudes, superficies y volúmenes. Para medirlas se ha buscado una unidad fundamental, que es la unidad de longitud. Las unidades de superficie y de volumen son, pues, unidades derivadas, cuyas definiciones ya hemos estudiado (9).

Factor de conversión para las superficies. — *Dimensiones de una superficie.* — Supongamos que se cambia la unidad de longitud, y sea $[L]$ la medida de la primera unidad por medio de la segunda. Como la unidad de superficie es la superficie de un cuadrado que tiene por lado la unidad de longitud, varía proporcionalmente al cuadrado de la unidad de longitud; en efecto, si la unidad de longitud se hace 2, 3, 4..... $[L]$ veces más pequeña, la unidad de superficie se vuelve 4, 9, 16..... $[L]^2$ veces menor. Luego si $[L]$ es la medida de la primera unidad de longitud por medio de la segunda, la medida $[S]$ de la primera unidad de superficie por medio de la segunda será :

$$[S] = [L]^2.$$

Si el factor de conversión para las longitudes es $[L]$, el factor de conversión para las superficies será $[L]^2$.

Por esta razón, diremos que *una superficie es de segundo grado respecto de sus longitudes.*

La ecuación $[S] = [L]^2$ se llama *fórmula de dimensiones* de las superficies.

Por lo tanto, si una superficie dada está medida por el número s en el primer sistema de unidades, estará medida en el segundo sistema, por un número s' tal que

$$s' = s [S], \quad \text{o} \quad s' = s [L]^2.$$

Factor de conversión para los volúmenes. — *Dimensión de un volumen.* — Si la unidad de longitud se hace 2, 3..... $[L]$ veces más pequeña, la unidad de volumen, que es el volumen del cubo que tiene por arista la unidad de longitud, se vuelve $2^3, 3^3, \dots [L]^3$ veces menor.

Por consiguiente, si $[L]$ es la medida de la primera unidad de longitud por medio de la segunda, la medida $[V]$ de la primera unidad de volumen por medio de la segunda será :

$$[V] = [L]^3$$

tal es la *fórmula de dimensiones de los volúmenes.*

Dícese entonces que *un volumen es de tercer grado con respecto a las longitudes.*

Por lo tanto, si un volumen dado está representado por el número v en el primer sistema de unidades, estará representado, en el segundo sistema, por el número

$$v' = v [V], \quad \text{o} \quad v' = v [L]^3.$$

$[L]^3$ es el factor de conversión para los volúmenes.

1092. **Coefficientes y magnitudes sin dimensiones.** — Ciertos coeficientes que entran en las fórmulas de geometría, mecánica o física no dependen de las unidades elegidas. Dícese que no tienen dimensiones.

Tal es el número π . En efecto, este número es la relación entre el número l que mide la longitud de una circunferencia y el número d que mide la longitud de su diámetro.

Si cambiamos la unidad de longitud, como el factor de conversión es $[L]$, el número que mide la longitud de la circunferencia se convierte en $l' = l [L]$; el que mide la longitud del diámetro se vuelve $d' = d [L]$; el cociente $\frac{l'}{d'}$ permanece igual a $\frac{l}{d}$, es decir, a π .

Lo mismo ocurre con las magnitudes que se definen por medio de la relación entre los números que miden dos magnitudes de la misma especie. Tales son las líneas trigonométricas de un ángulo. El número que mide una línea trigonométrica cualquiera : seno, coseno, tangente, etc., es, en efecto, igual a la relación entre los números que miden dos longitudes.

Ejemplo sacado de la Física es el de la densidad relativa de un cuerpo con relación a otro, el agua, por ejemplo. Sea m la masa de un cuerpo; m' , la masa del mismo volumen de agua a la temperatura de 4° centígrados; llamamos densidad del cuerpo con relación al agua, al número $d = \frac{m}{m'}$. Si se cambia la unidad de masa, cambiarán también los números m y m' ; pero su relación permanece constante. La masa específica de un cuerpo depende, al contrario, de las unidades escogidas.

1093. **Velocidad y aceleración.** — Las unidades cinemáticas (de velocidad y de aceleración) derivan a la vez de la unidad de longitud y de la unidad de tiempo.

Factor de conversión para las velocidades. — *Dimensiones de una velocidad.* — Consideremos un movimiento uniforme. Sea, expresado por medio de cierta unidad de longitud,

el número que mide el espacio recorrido por el móvil, durante un tiempo cuya medida es t , por medio de cierta unidad de tiempo.

El número v que mide la velocidad del móvil, lo da, por definición, la relación

$$v = \frac{e}{t}.$$

Variemos la unidad de longitud, y sea $[L]$ el factor de conversión.

Variemos también la unidad de tiempo, y sea $[T]$ el factor de conversión relativo a este cambio de unidad.

El número que mide el espacio considerado se convierte en

$$e' = e [L].$$

Por su parte, el número que mide el tiempo en que es recorrido este espacio se convierte en

$$t' = t [T].$$

Por definición, el número que mide la velocidad conviértese en

$$v' = \frac{e'}{t'}, \quad \text{o} \quad v' = \frac{e [L]}{t [T]} = v \frac{[L]}{[T]},$$

que puede expresarse también :

$$v' = v [L] [T]^{-1}.$$

Luego el factor de conversión para las velocidades es

$$[V] = \frac{[L]}{[T]}, \quad \text{o} \quad [V] = [L] [T]^{-1}.$$

Tal es la fórmula de dimensiones de una velocidad.

OBSERVACIONES. — 1º Por causa de la definición de la velocidad se ve que una velocidad es igual al cociente de una longitud por un tiempo. Del mismo modo hemos hallado que el factor de conversión de las velocidades es igual al cociente del factor de conversión de las longitudes por el factor de conversión de los tiempos.

2º El resultado precedente se expresa diciendo que una velocidad es del primer grado con relación a las longitudes y del grado -1 con relación a los tiempos.

3º Si cambia una sola de las dos unidades fundamentales, el factor de conversión relativo a la otra unidad debe tomarse igual a 1.

Factor de conversión para las aceleraciones. — Dimensiones de una aceleración. — Consideremos un movimiento uniformemente acelerado, y sea, en un primer sistema de unidades, v el número que mide el aumento de la velocidad del móvil durante un tiempo medido por el número t .

El número γ que mide la aceleración del movimiento es, por definición :

$$\gamma = \frac{v}{t}.$$

Cambiamos a la vez la unidad de longitud y la unidad de tiempo, y sean $[L]$ y $[T]$ los factores de conversión relativos a estos cambios. El número que mide la variación de velocidad considerada es

$$v' = v \frac{[L]}{[T]};$$

el número que mide el tiempo en que se ha producido esta variación, se convierte, a su vez, en

$$t' = t [T].$$

Luego el número que mide la aceleración será :

$$\gamma' = \frac{v'}{t'} = \frac{v [L]}{t [T]^2} = \gamma \frac{[L]}{[T]^2}.$$

que también puede expresarse por

$$\gamma' = \gamma [L] [T]^{-2}.$$

Luego el factor de conversión para las aceleraciones es

$$[T] = \frac{[L]}{[T]^2}, \quad \text{o} \quad [T] = [L] [T]^{-2}.$$

OBSERVACIONES. — 1º Por definición, una aceleración es el cociente de una velocidad por un tiempo; también hemos visto que el factor de conversión de las aceleraciones es igual

al cociente del factor de conversión de las velocidades por el factor de conversión de los tiempos.

2ª Dicese que una aceleración es de primer grado con relación a las longitudes, y de grado — 2 con relación al tiempo.

1094. Fuerza, presión, trabajo y potencia. — En dinámica (en el sistema cegesimal) encontramos una nueva unidad fundamental, la unidad de masa. De modo que las unidades de fuerza, de trabajo y de potencia son unidades derivadas.

Factor de conversión para las fuerzas. — Dimensiones de una fuerza. — Supongamos que una fuerza constante en magnitud y dirección actúa sobre un punto material. Sea, en un primer sistema de unidades, m el número que mide la masa del punto material y γ el que mide la aceleración que la fuerza considerada comunica al punto material. La intensidad de la fuerza está, por definición, medida por el número

$$f = m\gamma.$$

Cambiamos las unidades de longitud, de tiempo y de masa. Sean $[L]$, $[T]$, $[M]$ los factores de conversión referentes a estos cambios. El número que mide la masa del punto material se convierte en

$$m' = m [M].$$

Por su parte, el que mide la aceleración se vuelve

$$\gamma' = \gamma \frac{[L]}{[T]^2};$$

Lucgo el número que mide la intensidad de la fuerza es

$$f' = m'\gamma' = m\gamma \frac{[M][L]}{[T]^2}$$

es decir

$$f' = f \frac{[M][L]}{[T]^2} \quad \text{o} \quad f' = f [M][L][T]^{-2}.$$

Por lo tanto, el factor de conversión para las fuerzas es

$$[F] = \frac{[M][L]}{[T]^2}, \quad \text{o} \quad [F] = [M][L][T]^{-2}.$$

OBSERVACIONES. — 1ª Una fuerza es igual al producto de una masa por una aceleración. Del mismo modo, el factor de conversión de las fuerzas es el producto del factor de conversión de las masas por el factor de conversión de las aceleraciones.

2ª Dicese que una fuerza es de primer grado con respecto a las masas y a las longitudes, y de grado — 2 con respecto a los tiempos.

Factor de conversión para las presiones. — Dimensiones de una presión. — Consideremos una fuerza que obra normalmente sobre una superficie y sean, en un sistema determinado de unidades, f y s los números que miden la intensidad de la fuerza y el área de la superficie. Por definición, el número que mide la presión que reina en la superficie es

$$p = \frac{f}{s}.$$

Se ve que una presión es igual al cociente de una fuerza por una superficie. Cambiamos las unidades fundamentales de longitud, de tiempo y de masa, y sean $[L]$, $[T]$, $[M]$ los factores de conversión relativos a estos cambios. Razonando como en el caso anterior se demostraría fácilmente que el factor de conversión $[P]$ para las presiones se obtiene efectuando el cociente del factor de conversión de las fuerzas por el factor de conversión de las superficies.

Luego

$$[P] = \frac{[F]}{[S]}; \quad \text{de donde} \quad [P] = \frac{[M]}{[L][T]^2} \quad \text{o} \quad [P] = [M][L]^{-1}[T]^{-2}.$$

Factor de conversión para los trabajos de las fuerzas. — Dimensiones de un trabajo. — Consideremos una fuerza constante cuyo punto de aplicación se mueva en su propia dirección y sean f y e los números que, en un sistema determinado de unidades, miden la intensidad de la fuerza y del movimiento.

El número que mide el trabajo de la fuerza es, por definición,

$$\tilde{U} = fe.$$

Se ve, pues, que un trabajo es igual al producto de una fuerza por una longitud.

Cambiamos las unidades de longitud, de tiempo y de masa y sean $[L]$, $[T]$, $[M]$ los

factores de conversión relativos a estos cambios de unidades. Fácilmente se demostraría que el factor de conversión $[\mathcal{C}]$ para los trabajos de las fuerzas se obtiene multiplicando el factor de conversión de las fuerzas por el factor de conversión de las longitudes. Por lo tanto, la ecuación de dimensión de un trabajo será

$$[\mathcal{C}] = [F] [L]; \quad \text{de donde} \quad [\mathcal{C}] = \frac{[M] [L]^2}{[T]^2}, \quad \text{o} \quad [\mathcal{C}] = [M] [L]^2 [T]^{-2}.$$

Factor de conversión de la energía cinética o potencial. — Dimensiones de una energía. — 1º Energía cinética. — Supongamos un punto material cuyas masa y velocidad, medidas según un sistema determinado de unidades, son m y v . La energía cinética de dicho punto material es :

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} m v^2.$$

Luego es el producto de un coeficiente numérico, que no depende de las unidades, de una masa y del cuadrado de una velocidad.

Cambiamos las unidades fundamentales, y sean $[L]$ $[T]$ $[M]$ los factores de conversión relativos a los cambios. Los números que miden la masa y la velocidad del punto material se convierten respectivamente en $m' = m [M]$ y $v' = v \frac{[L]}{[T]}$. El número que mide la energía cinética se transforma en $\mathcal{E}' = \frac{1}{2} m' v'^2 = \frac{1}{2} m v^2 \frac{[M] [L]^2}{[T]^2} = \mathcal{E} \frac{[M] [L]^2}{[T]^2}$.

El factor de conversión de la energía cinética es, pues,

$$[\mathcal{E}] = \frac{[M] [L]^2}{[T]^2} = [M] [L]^2 [T]^{-2}.$$

Se ve que las dimensiones de una energía cinética son las mismas que las de un trabajo, lo cual podía preverse *á priori*.

2º Energía potencial. — La energía potencial de un sistema se expresa por el trabajo que puede suministrar el sistema. Por lo tanto, tiene, como la energía cinética, las mismas dimensiones que un trabajo.

Factor de conversión para las potencias. — Dimensiones de una potencia. — El número W que mide la potencia de una máquina se obtiene efectuando el cociente del número \mathcal{C} que mide el trabajo realizado por dicha máquina, por el número t que mide el tiempo durante el cual se produce el citado trabajo. Luego, tenemos

$$W = \frac{\mathcal{C}}{t}.$$

Por consiguiente, es fácil demostrar que el factor $[W]$ de conversión de una potencia se obtiene efectuando el cociente del factor de conversión $[\mathcal{C}]$ de los trabajos, por el factor de conversión $[T]$ de los tiempos.

Luego tenemos por ecuación de las dimensiones de una potencia

$$[W] = \frac{[\mathcal{C}]}{[T]}; \quad \text{de donde} \quad [W] = \frac{[M] [L]^2}{[T]^3}, \quad \text{o} \quad [W] = [M] [L]^2 [T]^{-3}.$$

1095. Masa específica y peso específico. — *1º Masa específica.* — La masa específica μ de un cuerpo es el cociente de su masa m por su volumen v .

Si cambiamos las unidades fundamentales, el factor de conversión $[\mu]$ de las masas específicas se obtiene efectuando el cociente entre el factor de conversión de las masas y el factor de conversión de los volúmenes. Luego tendremos :

$$[\mu] = \frac{[M]}{[V]} = \frac{[M]}{[L]^3}, \quad \text{o} \quad [\mu] = [M] [L]^{-3}.$$

2º Peso específico. — El peso específico ω de un cuerpo es el cociente entre su peso, que es una fuerza, y su volumen. El factor de conversión $[\omega]$ de los pesos específicos se obtiene por tanto, efectuando el cociente entre el factor de conversión de las fuerzas y el de los volúmenes. Luego, tendremos :

$$[\omega] = \frac{[M] [L]}{[T]^2 [L]^3} \quad \text{de donde} \quad [\omega] = \frac{M}{[T]^2 [L]^2}, \quad \text{o} \quad \omega = [M] [L]^{-2} [T]^{-2}.$$

1096. Homogeneidad de las fórmulas. — Toda fórmula de geometría, de mecánica o de física puede contener, en sus dos miembros, diversos términos en los cuales entren can-

tidades que midan ciertos números de magnitudes. Supongamos que estas fórmulas subsistan cualesquiera que sean las unidades empleadas. Si se cambian las unidades es preciso que todos los términos se multipliquen por el mismo factor de conversión. Luego todos los términos deben tener las mismas dimensiones. Esto se expresa diciendo que la fórmula es *homogénea*.

EJEMPLOS. — 1° Supongamos un cilindro de altura h y de radio R , terminado por un hemisferio de igual radio. Su volumen v se expresa por la fórmula

$$v = \pi R^2 h + \frac{2}{3} \pi R^3.$$

El término único del primer miembro es un volumen; sus dimensiones son $[L]^3$. Es fácil ver que los dos términos del segundo miembro tienen las mismas dimensiones. En efecto, los factores π y $\frac{2}{3}$ carecen de dimensiones. El primer término $\pi R^2 h$ tiene, pues, por dimensiones, el producto del cuadrado de una longitud por una anchura, es decir, $[L]^2 [L]$ o $[L]^3$. El segundo término $\frac{2}{3} \pi R^3$ tiene las dimensiones del cubo de una longitud o sea también $[L]^3$.

2° Sea la fórmula

$$e = v_0 t + \frac{1}{2} g t^2,$$

que expresa el espacio recorrido por un proyectil, lanzado de arriba abajo con la velocidad v_0 .

El término único del primer miembro tiene las dimensiones de una longitud, sea $[L]$. El término $v_0 t$ es una velocidad multiplicada por un tiempo; sus dimensiones son $\frac{[L]}{[T]} \times [T]$ o $[L]$. El término $\frac{1}{2} g t^2$ tiene las dimensiones de una aceleración multiplicada por el cuadrado de un tiempo, es decir $\frac{[L]}{[T]^2} \times [T]^2$ o $[L]$. Luego todos los términos tienen las mismas dimensiones.

3° Sea $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ la duración de una oscilación simple de un péndulo. El primer miembro es un tiempo. En cuanto al segundo miembro, sus dimensiones son :

$$\sqrt{\frac{[L]}{[L]/[T]^2}} = \sqrt{[T]^2} = [T].$$

Luego tiene también las dimensiones de un tiempo.

4° Sea

$$p' - p = h \mu g.$$

la fórmula que expresa la diferencia de presión entre dos puntos de un fluido de masa específica μ , que presentan entre sí una diferencia de nivel h .

El primer miembro tiene las dimensiones de una presión, o sea $\frac{[M]}{[L] [T]^2}$. El segundo miembro tiene por dimensiones el producto de las dimensiones de una longitud, de una masa específica y de una aceleración, es decir

$$[L] \times \frac{[M]}{[L]^3} \times \frac{[L]}{[T]^2} = \frac{[M]}{[L] [T]^2}$$

Luego hay las mismas dimensiones que en el primer miembro.

OBSERVACIONES. — Estas consideraciones permiten evitar grandes errores en los problemas. Se debe llegar a una fórmula homogénea, es decir, cuyos términos tengan las mismas dimensiones.

DIMENSIONES DE LAS MAGNITUDES ELÉCTRICAS Y MAGNÉTICAS

1097. Sistema de unidades electromagnéticas cegesimalas. — 1° *Masa magnética*. — El sistema de unidades electromagnéticas está fundado en la definición de unidad de masa magnética. Esta elección se ha hecho de modo que la fuerza f que actúa entre dos

masas magnéticas m y m' , colocadas á la distancia d , se exprese por la fórmula simple

$$f = \frac{mm'}{d^2}.$$

Si llamamos respectivamente $[F]$ $[m]$ $[L]$ a los factores de conversión para las fuerzas, masas magnéticas y longitudes, se ve fácilmente que

$$[F] = \frac{[m]^2}{[L]^3}.$$

De donde

$$[m] = [L] \sqrt{[F]}, \quad \text{o} \quad [m] = [L] [F]^{\frac{1}{2}}, \quad \text{o} \quad \text{también} \quad [m] = [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{5}{2}} [T]^{-1}.$$

2º *Campo magnético. — Inducción magnética.* — La intensidad de un campo magnético es el cociente de la fuerza que se ejerce en un polo de imán por la masa magnética de este polo. Las dimensiones $[\mathcal{H}]$ de un campo magnético se obtienen, por consiguiente, efectuando el cociente de las dimensiones de una fuerza por las de una masa magnética. Luego

$$[\mathcal{H}] = \frac{[F]}{L \sqrt{[F]}} = \frac{\sqrt{[F]}}{L}, \quad \text{o} \quad [\mathcal{H}] = [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{-\frac{1}{2}} [T]^{-1}.$$

Una inducción magnética tiene las mismas dimensiones que un campo magnético.

3º *Momento magnético.* — Un momento magnético es el producto de una masa magnética por una longitud. Las dimensiones son, pues,

$$[Mb] = [L] \sqrt{[F]} \times [L], \quad \text{o} \quad [Mb] = [L]^2 \sqrt{[F]},$$

o también

$$[Mb] = [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{5}{2}} [T]^{-1}.$$

4º *Flujo magnético y flujo de inducción.* — El flujo magnético es el producto de un campo magnético por una superficie.

Sus dimensiones son pues

$$[\Phi] = \frac{\sqrt{[F]}}{[L]} \times [L]^2 = [L] \sqrt{[F]}, \quad \text{o} \quad \Phi = [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{3}{2}} [T]^{-1}.$$

Un flujo de inducción tiene las mismas dimensiones que un flujo magnético.

5º *Intensidad de una corriente eléctrica.* — La fórmula que da la intensidad de un campo magnético de un elemento de corriente es

$$\mathcal{H} = \frac{I \lambda \operatorname{sen} \theta}{r^2}.$$

De la que se deduce

$$I = \frac{r^2 \mathcal{H}}{\lambda \operatorname{sen} \theta}.$$

Fijándose en que $\operatorname{sen} \theta$ no tiene dimensiones, se ve que las dimensiones de una corriente eléctrica nos las da la fórmula

$$[I] = \frac{[L]^2 [\mathcal{H}]}{[L]}.$$

De donde $[I] = \sqrt{[F]}$, o también $[I] = [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{1}{2}} [T]^{-1}$.

6º *Cantidad de electricidad.* — La fórmula $Q = It$ indica que una cantidad de electricidad es igual al producto de una intensidad de corriente por un tiempo. Sus dimensiones son, pues :

$$[Q] = [I] [T]; \quad \text{de donde} \quad [Q] = [T] \sqrt{[F]}.$$

O también

$$[Q] = [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{1}{2}}.$$

7º *Fuerza electromotriz y diferencia de potencial.* — La fórmula $\mathcal{E} = eit$, de la que se extrae

$$e = \frac{\mathcal{E}}{it}$$

demuestra que las dimensiones de una fuerza electromotriz se obtienen efectuando el

cociente de las dimensiones de una energía por la de una cantidad de electricidad. Luego o

$$[e] = \frac{[F][L]}{[T]\sqrt{[F]}}$$

De donde

$$[e] = [L][T]^{-1}\sqrt{[F]}, \quad \text{o} \quad [e] = [M]^{\frac{1}{2}}[L]^{\frac{3}{2}}[T]^{-2}.$$

Una diferencia de potenciales eléctricos tiene las mismas dimensiones que una fuerza electromotriz.

8° *Resistencia eléctrica.* — La fórmula

$$\mathcal{E} = r^2 t$$

de la que se saca

$$[r] = \frac{\mathcal{E}}{i^2 t}$$

demuestra que para las dimensiones de una resistencia eléctrica tenemos:

$$[r] = \frac{[L]F}{[F] \times [T]}$$

De donde

$$[r] = \frac{[L]}{[T]}, \quad \text{o} \quad [r] = [L][T]^{-1}.$$

Se ve que una resistencia electromagnética tiene las mismas dimensiones que una velocidad.

9° *Capacidad eléctrica.* — La fórmula

$$Q = CV, \quad \text{de donde se saca} \quad C = \frac{Q}{V}$$

nos da, para las dimensiones de una capacidad eléctrica, en el sistema electromagnético,

$$C = \frac{[T]\sqrt{[F]}}{[L][T]^{-1}\sqrt{[F]}}$$

De donde

$$[C] = [L]^{-1}[T]^2.$$

Unidades prácticas electromagnéticas. — Las magnitudes expresadas en el sistema práctico de unidades eléctricas tienen las mismas dimensiones que en el sistema electromagnético cegesimal. En efecto, las unidades prácticas sólo difieren de las unidades electromagnéticas C.G.S. por factores numéricos sin dimensiones.

1098. *Sistema de unidades electroestáticas cegesimal.* — 1° *Cantidad de electricidad o masa eléctrica.* — El sistema electroestático C.G.S. se basa en la definición de la unidad electroestática de cantidad de electricidad o de masa eléctrica. Esta definición se ha dado de tal manera que, si llamamos q y q' a dos cantidades de electricidad expresadas en unidades electroestáticas, colocadas a una distancia d cm., se rechazan o se atraen con una fuerza cuya intensidad, f , nos la da en dinamias la sencilla fórmula

$$f = \frac{qq'}{d^2}.$$

De ahí se deduce que las dimensiones $[Q']$ de una cantidad de electricidad nos las da, en el sistema electroestático cegesimal, la relación

$$[F] = \frac{[Q']^2}{[L]^2}.$$

De donde

$$[Q'] = [L]\sqrt{[F]}, \quad \text{o} \quad [Q'] = [M]^{\frac{1}{2}}[L]^{\frac{3}{2}}[T]^{-1}.$$

2° *Intensidad de corriente.* — La unidad electroestática de intensidad de corriente eléctrica es la intensidad de una corriente que, en un segundo, suministra una unidad electroestática de cantidad de electricidad. Una corriente de intensidad electroestática I' suministra, pues en t segundos, una cantidad de electricidad

$$Q' = I' t.$$

Luego

$$I' = \frac{Q'}{t}.$$

De donde, para las dimensiones de una intensidad de corriente en el sistema electroestático, tendremos :

$$[I] = \frac{[L] \sqrt{[F]}}{[T]}, \quad \text{o} \quad [I] = [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{3}{2}} [T]^{-2}.$$

3º *Diferencia de potenciales.* — La fórmula

$$\mathcal{C} = qV, \quad \text{de donde se saca} \quad V = \frac{\mathcal{C}}{q},$$

demuestra que, para las dimensiones de una diferencia de potenciales en el sistema electroestático, tenemos

$$[V] = \frac{[L] [F]}{[L] \sqrt{[F]}}.$$

De donde

$$[V] = \sqrt{[F]}, \quad \text{o} \quad [V] = [M]^{\frac{1}{2}} [L]^{\frac{1}{2}} [T]^{-1}.$$

4º *Capacidad eléctrica.* — Las dimensiones de una capacidad eléctrica en el sistema electroestático, se deducen de la fórmula $Q = CV$. De ahí se saca

$$[C] = \frac{[Q]}{[V]} = \frac{[L] \sqrt{[F]}}{\sqrt{[F]}}.$$

De donde

$$[C] = [L].$$

Una capacidad en el sistema electroestático tiene las dimensiones de una longitud. Por ejemplo, recordaremos que la capacidad electroestática de una esfera está representada por el mismo número que su radio (934).

1099. **Comparación de las dimensiones de una cantidad de electricidad en el sistema electromagnético C.G.S. y en el sistema electroestático C.G.S.** — Establezcamos la relación de las dimensiones de una cantidad de electricidad en el sistema electroestático y en el sistema electromagnético. Hallaremos

$$\frac{[Q']}{[Q]} = \frac{[L] \sqrt{[F]}}{[T] \sqrt{[F]}}, \quad \text{o} \quad \frac{[Q']}{[Q]} = \frac{[L]}{[T]}.$$

Esta relación tiene, pues, las mismas dimensiones que una velocidad.

Ya hemos visto (954) que si se efectúa el cociente del número que mide una cantidad de electricidad en el sistema electroestático por el número que mide la misma cantidad de electricidad en el sistema electromagnético, se obtiene un número que es igual a la velocidad de la luz.

CAPÍTULO II.

PROBLEMAS DE FÍSICA CON SOLUCIONES

FUERZAS. — GRAVEDAD. — MÁQUINAS SIMPLES

I. — Suponiendo la arista de una tijera constituida por una pequeña superficie rectangular de 1 mm. de ancho y 2 cm. de largo, calcular la presión que ejerce la tijera sobre un plano contra el cual apoya normalmente con un esfuerzo de 10 kg.

Solución : 500 kg. por cm.²

II. — Se coloca el extremo de una barra de hierro AB (fig. 31) de 1 m. de largo, bajo una piedra pesada, y se dispone un apoyo C, a 10 cm. del extremo B. Apóyase contra

ol otro extremo con una fuerza de 20 kg., insuficiente para levantar la piedra. Se pregunta :

1° El esfuerzo ejercido en la piedra.

2° La fuerza con que la palanca apoya contra el soporte C.

Solución : 1° 180 kg.

2° 200 kg.

III. — El radio del cilindro de un torno es de 10 cm.; el del manubrio, de 40 cm. Una cuerda que se enrolla en el cilindro soporta un fardo que pesa 80 kg., y que se halla colocado a 15,70 m. debajo del suelo. Se pide : 1° la fuerza que debe actuar sobre el manubrio; 2° cuántas revoluciones del manubrio harán falta para trasladar el fardo hasta el suelo.

Solución : 1° 20 kg.

2° 25 revoluciones.

IV. — ¿Qué trabajo se debe desarrollar por cada vuelta de manubrio de un torno cuyo cilindro tiene 10 cm. de radio y que levanta un fardo de 100 kg.? Supondremos que los frotamientos absorben un 15 por 100 del trabajo motor. El trabajo útil pedido se evaluará : 1° en kilográmetros, 2° en julios.

Solución : 1° 73,9 kgm.

2° 725 julios.

V. — Evaluar : 1° en caballos de vapor, 2° en kilovatios, la potencia de una máquina que acciona una bomba que eleva por minuto 750 litros de agua a 36 metros de altura, sabiendo que, a causa de los frotamientos, sólo se utilizan las 60 centésimas partes del trabajo de la máquina.

Solución : 1° 10 caballos de vapor.

2° 7,36 kilovatios.

DENSIDADES

VI. — ¿Cuál es la masa de 1 000 m. de un alambre de cobre que tiene un milímetro cuadrado de sección?

Densidad del cobre 8,8.

Solución : 8 800 kg.

VII. — En la determinación de una densidad de líquido se ha hallado, para la masa del líquido en estudio que llena el frasco, 152,4 g., y para la masa de agua que llena el mismo frasco, 112,3 g. Sabemos que el error posible puede llegar a 1 decigramo. ¿Cuál es la densidad del líquido con relación al agua, y con qué aproximación la conocemos?

Solución : Puesto que el error en cada pesada ha podido llegar a 0,1 gr., esto quiere decir que las masas del líquido y del agua que llenan el frasco están comprendidas respectivamente entre $152,4 \pm 0,1$ (sea 152,5 y 152,3) y $112,3 \pm 0,1$ (sea 112,4 y 112,2.) Siendo la densidad el cociente de la masa del líquido por la del agua, tendremos el valor mayor, entre los que la experiencia indica como posibles, tomando, para la masa del líquido, el valor mayor 152,5 y, para la masa del agua, el valor menor 112,2. Por el contrario, el valor menor posible para la densidad se obtendrá sacando el cociente de 152,3 por 112,4.

Luego la densidad buscada está comprendida entre

$$\frac{152,5}{112,2} = 1,359 \quad \text{y} \quad \frac{152,3}{112,4} = 1,355.$$

Se tomará, como valor de la densidad, el término medio

$$1,357;$$

no pudiendo ser el error superior a 2 unidades en la cifra de las milésimas, en más o en menos.

VIII. — Buscando la densidad de un sólido, se ha encontrado que la masa de un fragmento de este sólido a 0° es 25,830 g. con aproximación de 1 mmg., mientras que la masa de agua que ocupa el mismo volumen a 0° es 2,919 con aproximación de 1 mmg. ¿Cuál es la densidad absoluta del sólido a 0°, y con qué precisión se la conoce? Se da la densidad absoluta del agua a 0°, 0,9998.

Solución : 8,847, con error máximo de 4 unidades en la última cifra.

DINÁMICA. — CAÍDA DE LOS CUERPOS. — RESISTENCIA DEL AIRE. — PÉNDULO

IX. — ¿Durante cuánto tiempo debería caer un cuerpo en el vacío para adquirir, en París, una velocidad de 600 m. por segundo, que es la de una bala de fusil Lobel? ¿Cuál es, pues, en ergamias y en julios, su energía cinética E , si su masa es de 10 gramos?

Solución: $t = 61^s,16$.

$E = 18\ 000\ 000\ 000$ ergamias = 1 800 julios.

X. — Lanzado verticalmente en el vacío de abajo arriba un proyectil, con velocidad inicial de 2 m. por segundo, ¿cuánto tiempo tardará en detenerse para volver a caer y a qué altura se elevará?

Solución: $t = 0,204$ s.

$h = 20,4$ cm.

XI. — El peso de una máquina de Morin cuyo cilindro está animado de un movimiento de rotación uniforme, se halla en la parte más baja de su carrera, y, en estas condiciones, se le lanza verticalmente de abajo arriba con cierta velocidad. Después del experimento, se observa que el lápiz de que está provisto ha trazado en la hoja de papel del cilindro una curva AMB cuya ordenada máxima paralela al eje del cilindro tiene una longitud de 781 mm. La distancia AB de los puntos en que la curva corta a la horizontal del punto A es 40 cm. Se desea saber:

1º Cuál era la velocidad inicial del peso;

2º Cuál es el número de vueltas que da el cilindro por segundo, sabiendo que su circunferencia de base es 50 cm.;

3º Cuál es la naturaleza de la curva trazada por el lápiz.

Tómese la aceleración de la caída de los cuerpos igual a 980 C. G. S.

(*Bacc. Mathématiques*, Dijon, juillet 1906.)

Solución: 1º 3,92 m. por segundo.

2º 1 vuelta por segundo.

3º La curva es una parábola.

XII. — Los pesos A y B de una máquina de Atwood pesan cada uno 60 gramos; hállanse en equilibrio, estando el peso A en el nivel del cero de la regla vertical. Se añade al peso A una masa de 5 gramos, que determina, sin velocidad inicial, el movimiento del sistema.

¿A qué distancia del cero se encontrará el cuerpo A a los 2 segundos de caída, y cuál será su velocidad en ese momento?

En ese momento preciso, continuando la sobrecarga de 5 gramos encima del peso A, el peso B está sobrecargado de un peso de 11 g. 25 mediante una disposición conveniente. ¿A qué distancia del cero se encontrará el peso A cuando la máquina se detenga, antes de empezar en sentido inverso?

Si se deja que la máquina se mueva en este nuevo sentido, ¿cuál será la velocidad del peso A cuando vuelva al cero de la regla, y cuál el tiempo transcurrido desde que se empezó el experimento?

La aceleración de la gravedad es 981 cm. (*Escuela especial militar*, 1911.)

Solución: A los 2 segundos de caída, A estará a 78.48 cm. del cero de la regla y su velocidad será 78,48 cm. por segundo.

El peso A se detiene a 147 cm. del cero.

Al volver al cero de la regla, el peso A adquiere una velocidad de 115 cm. por segundo. El tiempo total transcurrido desde que se empezó el experimento es 6,3 segundos.

XIII. — Una esfera hueca, de espesor constante, que cae libremente en el aire en reposo, alcanza una velocidad límite de 10 m. por segundo. Se atornilla normalmente en esta esfera una varilla muy fina, de modo que el sistema de varilla y esfera, análogo a un péndulo, pueda ser suspendido de un punto fijo y tomar todas las posiciones posibles. Se expone este sistema a un viento de dirección horizontal y se observa que la varilla del sistema forma un ángulo de 45° con la vertical. So hace caso omiso del peso de la varilla y de la acción del viento sobre ella:

1º ¿Cuál es la velocidad del viento?

2º ¿Cuáles serían las velocidades respectivas del viento si el ángulo de la varilla con la vertical fuera sucesivamente de 30° o de 60° grados?

3º Estando el aparato graduado, no sólo para 30°, 45° y 60°, sino para todos los ángulos de grado en grado, ¿cómo se podría modificar simplemente el aparato, para que as velocidades del viento correspondientes a cada ángulo sean dobles de las precedentes?

4º Sabiendo que la esfera hueca cuya velocidad límite es 10 m. por segundo, tiene un peso de 41,888 g. y un radio exterior de 7 cm., calcular el radio que debería tener un paracaídas plano de forma circular, de modo que la velocidad límite del sistema compuesto del paracaídas, de la barquilla, de las cuerdas necesarias y de un observador sea de 5 m. por segundo. (El peso reunido de la barquilla, del observador y de las cuerdas es 100 kg.: el peso de la materia que constituye la superficie portadora del paracaídas es 400 g. por metro superficial. Se admitirá que la constante que entra en la fórmula de la resistencia del aire es la misma para la esfera y para el paracaídas.)

(*Escuela especial militar*, 1912.)

Solución : 1º 10 m. por segundo.

2º Velocidad del viento correspondiente al ángulo de 30º, 7,60 m. por segundo; velocidad para el ángulo de 60º, 13,16 m. por segundo.

3º Basta hacer 4 veces más grande el peso de la esfera, sin cambiar su radio, introduciendo un cuerpo pesado en su interior.

4º 10,66 m.

XIV. — Un péndulo simple OA tiene 0,50 m. de largo, y la masa pesada A se halla a 1 m. del suelo BC. Se aparta el péndulo de la vertical, en un ángulo de 4º y se le abandona a sí mismo.

Cuando pasa sobre la vertical OAB, se quema el hilo, y la masa A va a caer al suelo en un punto C. Se desea saber : 1º la duración de oscilación del péndulo; 2º la magnitud y la dirección de la velocidad de la masa A, cuando pasa por la vertical; 3º la distancia BC del punto C al punto B de la vertical OA. Hágase $g = 980$ C.G.S.

(*Bacc. Mathématiques*, Aix-Marseille, octubre 1906.)

Solución : 1º duración de una oscilación completa 1,42 s.

2º velocidad horizontal = $15,45 \frac{cm}{s}$.

3º 7 cm.

XV. — Ante el péndulo de un reloj que marca los segundos, se suspende una bolita de hierro cuya masa sea de 812 miligramos, de un hilo inextensible, de 1 m. 35 de largo.

Un imán colocado debajo ejerce, sobre esta bola, una fuerza atractiva que se puede considerar constante, vertical y proporcional a la masa de hierro.

Haciendo oscilar este péndulo de masa de hierro, se nota que su período es algo más corto que el del péndulo del reloj; por otra parte, obsérvase que los dos péndulos pasan juntos por la vertical a las horas siguientes :

8 h. 32 m. 43 s.; 8 h. 37 m. 41 s.; 8 h. 42 m. 39 s., etc.

Deducir de estas observaciones, el valor en dinas de la fuerza que el imán ejerce sobre la bola de hierro.

Tómese como intensidad de la gravedad $g = 981$.

(*Bacc. Mathématiques*, Chambéry, julio 1906.)

Solución : 220 dinas.

XVI. — Se coloca un reloj exactamente arreglado al nivel del mar en un punto de la tierra donde $g = 981$ y el radio terrestre vale 6360 kilómetros.

Se le transporta en la vertical del lugar a una altura de 6360 metros.

Determinar :

1º El sentido y el valor de la variación diaria que experimenta el reloj;

2º ¿De qué fracción de su longitud primitiva y en qué sentido será, preciso variar la longitud del péndulo para corregir la variación observada?

(*Bacc. Mathématiques*, Caen, octubre 1909.)

Solución : Sean g la intensidad de la gravedad al nivel del mar y g' la intensidad de la gravedad a la altitud $z = 6,360$ metros, R el radio de la tierra. Se tiene (112).

$$g' = g \left(1 - \frac{2z}{R}\right) = g \left(1 - \frac{2 \times 6360}{6360000}\right) = g \left(1 - \frac{2}{1000}\right) = g \times 0,998,$$

de donde

$$\frac{g}{g'} = 0,998.$$

Por otra parte, sean l la longitud del péndulo simple sincrónico de la péndola del reloj, n el número de períodos que esta péndola debe ejecutar para que la aguja de los segundos avanco una división, T el período de la péndola en el nivel del mar, T' el período en la altitud z . Se tiene

$$T = \frac{1}{n} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad [1]$$

Además, el reloj atrasará ciertamente en la altitud z , porque teniendo en ésta menos valor la intensidad de la gravedad que en el nivel del mar, será mayor la duración de oscilación de la péndola. Sea entonces x el número de segundos de atraso en un día ($0,24 \times 60 \times 60 = 86\ 400$ segundos). Luego en la altitud z , la péndola ha efectuado en un día ($86\ 400 - x$) n períodos, por consiguiente su período es :

$$T' = \frac{86\ 400}{(86\ 400 - x)n} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad [2]$$

Dividiendo las ecuaciones (1) y (2) miembro a miembro, se tiene :

$$\frac{86\ 400 - x}{86\ 400} = \sqrt{\frac{g'}{g}} = \sqrt{0,998}, \quad \text{de donde} \quad x = 87^s \quad \text{o} \quad 1^m, 27^s,$$

luego el reloj atrasará 1 m. 27^s por día.

XVII. — Estando arreglados exactamente en un mismo punto dos relojes A y B, se lleva uno de ellos, B, a otro punto, de una altitud de 4000 metros sobre el nivel del reloj A. Por medio de una señal eléctrica, cuya velocidad de propagación puede considerarse como infinita, se les echa a andar al mismo tiempo a mediodía. Cuando el reloj A marca medianoche, se produce cerca de éste una señal sonora que el observador puesto cerca de B percibe exactamente en el momento que este reloj marca también media noche. ¿Cuál es la distancia de los dos relojes?

Se tomará como velocidad del sonido en el aire 340 metros por segundo y como radio de la tierra 6360 kilómetros. *(Escuela especial militar. 1910.)*

Solución : 9 200 metros.

HIDROSTÁTICA. — PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES. — CUERPOS FLOTANTES

XVIII. — ¿Cuál es en kg., por cm.², la presión sobre la superficie interior de una cañería de agua, que comunica con un recipiente en que el nivel de agua está a 20' m. sobre el punto considerado de la cañería?

Solución : 2 kg. por cm.².

XIX. — La fuerza con que se mueve una prensa hidráulica es 20 kg.; el brazo de palanca sobre que actúa esta fuerza es 5 veces el de la resistencia; las superficies de los émbolos son respectivamente 10 y 700 cm.². Se desea saber :

1º La fuerza ejercida por el émbolo mayor.

2º A qué altura se elevaría el agua en un tubo vertical puesto en comunicación con el cilindro mayor.

Solución : 1º 7000 kilogramos.

2º 100 metros.

XX. — En un tubo en U se introduce primero mercurio y, en una de sus ramas, se añade otro líquido. Las superficies libres del mercurio y del otro líquido están respectivamente a 4,5 cm. y a 42,0 cm. sobre su plano horizontal de separación. Se pide la densidad del segundo líquido con relación al mercurio y con relación al agua.

Supónese que la densidad del mercurio es igual a 13,6.

Solución : Densidad con relación al mercurio 0,107.

Densidad con relación al agua 1,456.

XXI. — La densidad del hierro compacto es 7,8. Un trozo de hierro de 200 gr. sumergido en el agua sufre un empuje de 27,2 g. ¿Cuál es el volumen de las rebolladuras interiores que contiene el trozo de hierro?

Solución : 1,56 cm.³.

XXII. — ¿Qué volumen de mercurio (densidad 13,6) debe introducirse en un tubo de vidrio cilíndrico, que pese 40 g. y tenga una sección exterior de 2 cm.². para que se introduzca 20 cm. en un líquido de densidad 1,5?

Solución : 1,47 cm.³.

PRESIONES DE LOS GASES. — LEY DE MARIOTTE. — PRINCIPIO
DE ARQUÍMEDES APLICADO A LOS GASES

XXIII. — ¿Qué fuerza ejerce la presión atmosférica sobre 1 m². colocado en la cima de una montaña cuya altura barométrica sea 70 cm.?

Densidad del mercurio 13,6.

Solución : 9 520 kg.

XXIV. — Un recipiente de 30 litros de capacidad contiene oxígeno comprimido a 50 kg. por cm². ¿Qué volumen ocupará este gas a la misma temperatura y a la presión atmosférica normal?

Solución : 1 452 litros.

XXV. — Una probeta cilíndrica de 10 cm². de sección está incompletamente llena de un gas que ocupa en ella una longitud de 10 cm.; el mercurio sube en la probeta a 15 cm. sobre el nivel en la ampolla. ¿Cuál será el volumen del gas si se sumerge la probeta hasta que los niveles exterior é interior se hallen en el mismo plano horizontal?

Altura barométrica del momento 75 cm.

Solución : $v = 80$ cm³.

XXVI. — Un tubo cilíndrico de longitud l está abierto por sus dos extremos; una parte de longitud l' se halla sumergida verticalmente en una cubeta de mercurio: ciérrase y se mantiene cerrado con el dedo el orificio superior del tubo; luego, levántase verticalmente todo entero, hasta que la parte inferior deje de sumergirse en el mercurio de la cubeta. Se trata de calcular la longitud x comprendida entre los niveles que el mercurio ocupa en el tubo en la primera y segunda posición. Designase por H la altura del barómetro durante el experimento.

Aplicación numérica :

$$l = 0 \text{ m. } 85. \quad l' = 0 \text{ m. } 32 \quad H = 0 \text{ m. } 80.$$

Solución : Primitivamente, el volumen del aire era $(l - l')s$, (siendo s la sección del tubo); su presión, H . Cuando la probeta se halla levantada, el volumen es $(l - x)s$; la presión, $H - x$; luego, según la ley de Mariotte :

$$(l - l')H = (l - x)(H - x).$$

De donde

$$x^2 - (H + l)x + l'H = 0.$$

El término constante de esta ecuación es positivo, y el coeficiente de x negativo, por lo cual la ecuación tiene dos raíces positivas. Es fácil ver que una de estas raíces es mayor y la otra menor que H ; substituyendo H a x en el primer miembro, hallamos, en efecto, el resultado negativo $(l' - l)H$; luego H está comprendida entre ambas raíces. Sólo puede convenir la más pequeña; pues la raíz superior a l es solución extraña. Luego :

$$x = \frac{H + l - \sqrt{(H + l)^2 - 4l'H}}{2}.$$

De donde, reemplazando las letras por sus valores numéricos :

$$x = 17,3 \text{ cm.}$$

XXVII. — ¿A qué altura se eleva el agua, después del primer golpe de émbolo, en el tubo de aspiración de una bomba, siendo de 50 cm. la carrera del émbolo, 6 m. la altura del tubo de aspiración; su sección $\frac{1}{10}$ de la del émbolo, y la presión inicial del aire en el tubo de aspiración igual a 10 metros de agua?

Solución : 2 m. 74.

XXVIII. — Para equilibrar el peso de un lingote de platino situado en el platillo de una balanza, se coloca en el otro platillo un peso de 27 g. de latón. ¿Cuánto se hubiera tenido que poner, si se hubiese efectuado la pesada en el vacío? — Se da la densidad del platino 21,5; la del latón 8,3; el aire, a 0° y bajo la presión de 75 cm., condiciones en que se opera, pesa 760 veces menos que el agua.

Solución : $x = 26$ gr. 996.

XXIX. — So tiene un aeróstato esférico de 4 m. de diámetro; se le llena de hidrógeno impuro que pesa 100 gr. el metro cúbico; el tafetán barnizado de que se compone la envoltura pesa 250 gr. el metro cuadrado. Se desea saber qué cantidad de hidrógeno hace falta para llenarlo y a qué peso puede equilibrarse, sabiendo que el metro cúbico de aire pesa 1 300 g.

Solución : Peso del hidrógeno = 3351 g.
Peso total equilibrado = 27646 g.

DILATACIONES. — DENSIDADES DE LOS GASES

XXX. — Se tiene una barra de 3 m. de un metal cuyo coeficiente de dilatación es $\frac{1}{754}$; otra barra de 5 m. de otro metal se dilata, para un mismo número de grados, tanto como la primera. Hallar su coeficiente de dilatación.

Solución : $x = \frac{3}{3770}$.

XXXI. — Siendo la dilatación del hierro, por cada grado de aumento de temperatura, 0,0000122 de la longitud medida a 0°, ¿cuál será a 60° la superficie de un disco circular de palastro que, a 0°, tiene 2,75 m. de diámetro?

Solución : Llamemos, en general, *coeficiente de dilatación superficial* de una substancia, y designemos por σ , al aumento que experimenta la unidad de superficie a 0° de una lámina de esta substancia, para un aumento de temperatura de 1°. Sea, además, λ el coeficiente de dilatación lineal de la substancia. Consideremos una lámina cuadrada, teniendo la unidad de longitud por lado a 0°. A t° su lado es $1 + \lambda t$ y su superficie

$$(1 + \lambda t)^2 = 1 + 2\lambda t + \lambda^2 t^2.$$

El aumento de superficie para t° es $(1 + \lambda t)^2 - 1 = 2\lambda t + \lambda^2 t^2$. Pero siendo λ insignificante, $\lambda^2 t^2$ es despreciable ante $2\lambda t$. Luego el aumento de superficie para t° es $2\lambda t$ y para 1° es 2λ . Luego tenemos $\sigma = 2\lambda$: *el coeficiente de dilatación superficial es igual a dos veces el coeficiente de dilatación lineal*. De aquí se deduce que si s_0 es la superficie de una lámina de cualquier forma a 0°, la superficie s de la misma lámina a t° es

$$s = s_0 (1 + \sigma t) \quad \text{o} \quad s = s_0 (1 + 2\lambda t).$$

En el caso del problema se tiene

$$s = \pi \times \frac{2,75^2}{4} (1 + 2 \times 0,0000122 \times 60) = 5,94 \text{ m}^2.$$

XXXII. — Sabemos que cada división de un termómetro de mercurio es $\frac{1}{6480}$ de la capacidad del depósito hasta el cero de la graduación. Esto sentado, si se vacía semejante termómetro, y se introduce hasta el cero en hielo fundido, un líquido cuyo coeficiente de dilatación absoluta sea $\frac{1}{2000}$, ¿hasta qué división se elevará el líquido a 20°, siendo $\frac{1}{38700}$ el coeficiente de dilatación cúbica del vidrio?

Solución : $n = 61,45$.

XXXIII. — Calcular la masa de nitrógeno que estaría contenida a 32° en un globo de vidrio cuyo volumen a 0° es 121,3; siendo el coeficiente de dilatación lineal del vidrio 0,0000061, y la densidad del nitrógeno 0,972; se supone que la presión atmosférica es igual a 76 cm.

Solución : $x = 13,836$ g.

XXXIV. — Una vejiga de paredes flexibles contiene 4 litros de aire a 30° y a la presión de 76 cm. Permaneciendo la misma la presión atmosférica, se trata de averiguar lo que cambiará el volumen de aire, si se desciende la vejiga a una profundidad de 100 m. en un lago cuya temperatura sea 4°.

Solución : $V = 0^l, 342$.

CALORES ESPECÍFICOS Y CALORES DE CAMBIOS DE ESTADO

XXXV. — En 25,45 g. de agua a 12°,5, se introducen 6,17 g. de un cuerpo a la temperatura de 80°; la mezcla adquiere una temperatura de 14°,17; se desea saber cuál es el calor específico de este cuerpo.

Solución : 0,104.

XXXVI. — Practicando una cavidad en un trozo de hielo, se encierra en él una masa de estaño que pesa 55 g. y cuya temperatura se ha subido de antemano a 100°. ¿Cuál será la masa de hielo fundido, sabiendo que el calor específico del estaño es 0,056, y que el calor de fusión del hielo es 80?

Solución : 3,85 gr.

XXXVII. — ¿Cuántos kg. de hielo a 0° se necesitan para liquidar y conducir a 0°,25 kg. de vapor de agua desprendido de un aparato en que el termómetro marque 100°, indicando el barómetro 76 cm. ?

Calor de fusión del hielo : 79.

Calor de vaporización del agua a 100° : 537.

Solución : 202 kg.

VAPORES

XXXVIII — En un vaso vacío de 2,02 litros de capacidad, se introduce primero 1 litro de aire seco, a la presión de 76 cm.; luego agua, en cantidad tal que, después de la vaporización, queden 20 cm³. en estado líquido. Se trata de hallar la presión interior, suponiendo que la temperatura sea de 30° en el momento del experimento.

Presión máxima del vapor de agua a 30° : 3,1 cm.

Solución : 41,1 cm.

XXXIX. — Cierta volumen V de un gas seco se halla a la temperatura de t° y a la presión H . Se lo satura de vapor de agua sin cambiar su temperatura ni su presión. ¿Qué volumen adoptará?

Aplicación numérica : $t = 30$; $H = 76$; $V = 1$ lit.

Presión máxima del vapor de agua a 30° : $F = 3,1$ cm.

Solución : $V' = \frac{VH}{H - F} = 1,042$ lit.

SOLUCIONES

XL. — Sabiendo que una molécula de un cuerpo no electrolizable disuelta en 100 gr. de agua disminuye en 1,85 el punto de congelación de ésta :

1° Calcular los pesos respectivos de alcohol ordinario C^2H^6O , de éter $C^4H^{10}O$ y de azúcar del caña $C^{12}H^{22}O^{11}$ que sería preciso disolver en la misma cantidad de agua para que el descenso del punto de congelación fuese 0°,5;

Tenemos $C = 12$, $H = 1$, $O = 16$;

Solución : 1° 12,4 g. de alcohol; 20 g. de éter; 92,4 g. de azúcar;

XLI. — Una disolución acuosa de densidad δ contiene, por litro, un peso P de una sal de peso molecular M ; esta solución es parcialmente disgregada; el grado de disgregación es decir el 0/0 de moléculas disgregadas es igual a α . El número de iones que da cada molécula es i . — Se desea saber cuál será la temperatura de congelación de la solución, admitiendo que las leyes de Raoult le sean aplicables y que los iones actúen como moléculas completas. El descenso molecular del punto de congelación para el agua es 1,85:

Aplicación numérica $P = 7$ g.; $M = 74,5$; $i = 2$; $\alpha = 0,72$; $\delta = 1,0017$.

(*Bacc. Mathématiques*, Grenoble, julio 1907).

Solución : Calculemos primero la constante de la fórmula $\theta = K \frac{c}{M}$ que da el descenso de la temperatura de congelación. Para 1 molécula-gramo de un cuerpo no electrizable, disuelta en 1 000 g. de agua, se tiene $c = \frac{M}{1000}$, con $\theta = 1,85$. Luego

$$1,85 = K \frac{M}{1000 M}, \quad \text{de donde} \quad K = 1850.$$

Sean ahora P' la masa de un litro de la solución en cuestión, se tiene $P' = 1000\delta$; la masa de agua contenida en el litro es $P' - P = 1000\delta - P$. Si el cuerpo disuelto no estuviera parcialmente disgregado en sus iones, el descenso de temperatura sería

$$1,850 \frac{P}{1000\delta - P} \cdot \frac{1}{M}.$$

La cantidad $\frac{P}{M}$ que entra en esta fórmula sería el número de moléculas de la sal contenidas en la solución: aquí se le debe reemplazar por el número total de moléculas no disueltas y de iones procedentes de las moléculas disueltas. Ahora bien, de 100 moléculas, 100α están disgregadas y dan $100\alpha i$ iones, mientras que $100 - 100\alpha$ no están disueltas, de tal modo que el número total de moléculas no disueltas y de iones es $100 - 100\alpha + 100\alpha i = 100 [1 + \alpha(i - 1)]$.

El número de estas moléculas y de estos iones, para $\frac{P}{M}$ moléculas disueltas será $\frac{P}{M} [1 + \alpha(i - 1)]$. Por consiguiente el descenso no conocido es

$$\theta = 1850 \frac{1}{1000\delta - P} \cdot \frac{P}{M} [1 + \alpha(i - 1)].$$

La aplicación numérica da $\theta = 0^{\circ},3$; luego la solución se congela a $-0^{\circ},3$.

EQUIVALENCIA DEL CALOR Y DEL TRABAJO. — MÁQUINAS TÉRMICAS

XLII. — Una bala de plomo, de fusil, de 20 g. de peso, se dispara con una velocidad de 600 m. por segundo, y encuentra un bloque de acero, fijo, contra el cual se aplasta. Calcular:

- 1° La cantidad de calor desarrollada;
- 2° La temperatura a que ha llegado la bala.

Datos:

Temperatura inicial, 15° ; punto de fusión del plomo, 325° ; calor de fusión, 5,8; calor específico en el estado sólido, 0,03; calor específico en estado líquido 0,04; equivalente mecánico del calor en julios 4,18. (*Bacc. Mathématiques*, Montpellier, julio 1906.)

Solución:

1° La velocidad de la bala es $v = 60\,000$ cm. por segundo, o 6×10^4 ; su energía cinética es pues $\frac{1}{2}mv^2 = 36 \times 10^9$ ergos, o 3 600 julios, que equivalen a $\frac{3\,600}{4,18} = 861$ calorías.

2° La cantidad de calor necesaria para llevar la bala a su punto de fusión es $20 \times 0,03 (325 - 15) = 186$ calorías; como es inferior a 810, el plomo llegará a lo menos a su punto de fusión.

La cantidad de calor necesaria para fundir la bala es $20 \times 5,8 = 116$ calorías; $186 + 116 = 302$ calorías siendo aún inferior a 861, la diferencia $861 - 302 = 559$ calorías será empleada para calentar el plomo líquido. La temperatura no conocida x será tal que

$$20 \times 0,04 (x - 325) = 559, \text{ de donde } x = 1023^{\circ}.$$

XLIII. — Una masa de mercurio de volumen igual a un decilitro cae, en un tubo de vidrio cerrado, de una altura de 4 m. 18. Se trata de calcular la elevación de temperatura del mercurio producida por esta caída. Se hace abstracción del frotamiento en las paredes del tubo de vidrio.

Densidad del mercurio 13,6. Aceleración debida a la gravedad = 981. Calor específico del mercurio = 0,0327. (*Bacc. Mathématiques*, Besançon, octubre 1906.)

Solución: 0,3.

XLIV. — La línea de mayor pendiente OA de un plano tiene una longitud de 39 m. 2. Un móvil que parte de O sin velocidad inicial, emplea 4 segundos en recorrer OA. ¿Qué ángulo forma OA con su proyección sobre el plano horizontal?

En seguida, del punto O, se lanza en una dirección OB' simétrica de OA con relación a la horizontal del punto O, un proyectil con tal velocidad que caiga en A. ¿Qué tiempo empleará para ir de O a A y qué velocidad se le habrá tenido que comunicar?

Finalmente, ¿qué cantidad de calor aparecería si, deteniéndose en A el proyectil, se hubiera transformado toda su energía en calor?

Datos numéricos: $g = 980$; equivalente mecánico de la caloria, 4,17 julios; masa del proyectil 100 g.

Nota. — Se hace abstracción del frotamiento del plano inclinado y de la resistencia del aire. (*Bacc. Mathématiques*, Paris, julio 1906.)

Solución: 1° $\alpha = 30^{\circ}$.

2° $t = 2,83$ s.

$$3^{\circ} v_0 = 1386 \frac{\text{cm}}{\text{s}}.$$

$$4^{\circ} 6,9 \text{ calorías.}$$

XLV. — Supongamos un martinete movido directamente por el émbolo de una máquina de vapor cuyo cilindro es vertical. El conjunto formado por el émbolo, el vástago y la masa del martillo pesa 3 toneladas; el cilindro tiene una sección recta de 30 dm², y la carrera del émbolo es 1 m. 09. Cuando el émbolo está arriba de su carrera, su cara inferior está en comunicación con el condensador, donde existe una presión constante de $\frac{1}{10}$ de kg. por cm²; la cara superior comunica con la caldera durante una parte de la carrera.

En un indicador de Watt, puesto en comunicación con la parte superior del cilindro, queda trazada, durante el descenso, una curva que, con las dos ordenadas extremas y el eje de los volúmenes, limita un área A. Puesto este mismo indicador en relación con la parte inferior del cilindro, trazaría, entre las mismas ordenadas extremas, y durante el descenso, una paralela al eje de los volúmenes: el área del rectángulo comprendido entre esta recta, el eje de los volúmenes y las ordenadas extremas es $a = \frac{A}{71}$. Se hace caso omiso de los fricciones.

Se pregunta: 1° Cuál es la fuerza viva del martinete al fin de la bajada del émbolo;

2° De qué altura debería caer el martinete (3 toneladas) para adquirir la misma fuerza viva, y cuál sería la duración de esta bajada;

3° A qué temperatura (evaluada con aproximación de un grado) subiría una masa de plomo a 0° de 11 kg. 881, si todo el calor desprendido en el choque fuera empleado en calentar el plomo ($\gamma = 981$; calor específico del plomo 0,03).

(*Bacc. Mathématiques*, Burdeos, julio 1910.)

Solución: 1° 26 160 kilogrametros;

2° altura 8,70 m., tiempo de bajada, 1,33 s.;

3° 172°.

XLVI. — Una máquina de vapor cuya potencia es 300 caballos, consume 3 kg. de hulla por minuto.

1° ¿Cuál es su rendimiento industrial?

2° La máquina no tiene más que un cilindro y el volumen que puede ocupar el vapor es 0,0628 m³. Sabiendo que es de doble efecto y que funciona sin expansión, efectuando 2 vueltas por segundo, se pregunta cuál es la presión del vapor que mueve la máquina; sábese que la presión en el condensador es 0 kg. 400 por cm².

Se sabe que un kilogramo de hulla desprende al quemarse 8 000 grandes calorías y que el equivalente mecánico de la grande caloría es 426 kilogrametros.

(*Bacc. Mathématiques*, Aix-Marsella, octubre 1910.)

Solución: 1° 0,13;

3° $9,3 \frac{\text{kg.}}{\text{cm}^2}$.

ACÚSTICA. — MOVIMIENTOS VIBRATORIOS

XLVII. — El estampido de un cañón ha empleado 15 segundos en transmitirse de un lugar a otro, siendo de 22° la temperatura; se desea saber la distancia entre estos dos lugares, sabiendo que la velocidad del sonido a 0° es 331 m.

Solución: $x = 5 160$ m.

XLVIII. — Se ha dejado caer una piedra en un pozo y el sonido por ella producido al encontrar el agua, no se ha oído sino 3 segundos después de haberla soltado. ¿Cuál es la profundidad del pozo, sabiendo que el sonido recorre 337 metros por segundo?

Solución: 40 m. 80.

XLIX. — En qué sentido y con qué velocidad debe moverse respecto de un observador inmóvil un foco sonoro, que, en reposo da el *la* normal, para que este observador oiga dicha nota sostenida? Para la velocidad del sonido, se adoptará la de 340 m. por segundo.

(*Bacc. Mathématiques*, Dijon, julio 1906.)

Solución: El foco debe acercarse al observador con una velocidad de 13,60 m. por segundo.

L. — Un diapasón que da la nota *do*, cae de una altura de 235 metros, abandonado a sí mismo sin velocidad inicial. En la trayectoria pueden escalonarse varios observadores.

Se pregunta : 1° Cuál será el número de vibraciones del sonido que oirá un observador colocado al nivel del suelo en el momento que el diapasón llega a este punto. 2° Cuál será la nota, o por lo menos la más próxima, con una coma de aproximación. 3° A qué altura deberá colocarse un observador para que el cambio de tono observado por éste en el momento que el diapasón pasa por delante de él sea de un tono menor.

Datos : número de vibraciones del *do*, 435 vibraciones por segundo; velocidad del sonido a la temperatura del experimento 340 metros por segundo; aceleración $a = 981$.

(*Escuela especial militar*, 1909.)

Solución : 1° 326 vibraciones por segundo;
2° *mi*,
3° a 218,70 m. sobre el suelo.

LI. — Una sirena cuyo disco tiene 10 agujeros está al unísono de una cuerda de acero de 1 metro de largo y 1 mm. de diámetro, estirada por un peso de 20 kg. a la que se hace dar el sonido fundamental (densidad del acero, 8). El disco da 10 vueltas mientras una péndola efectúa una oscilación completa.

Se desea saber la longitud de la péndola simple sincrónica.

(*Bacc. Mathématiques*, julio 1911.)

Solución : 31,83 cm.

LII. — ¿Cuál debe ser la longitud de un alambre de hierro de 1 mm. de diámetro, estirado por una fuerza de 10 megadinas, para que se obtenga la nota *do*, haciéndolo vibrar transversalmente?

Densidad del hierro 7,5; número de vibraciones de *la*, 435.

(*Bacc. Mathématiques*, Montpellier, octubre 1906.)

Solución : $l = 50$ cm.

LIII. — Los polos de un electroimán de forma de herradura se hallan colocados a poca distancia, y frente a la región media del alambre de longitud l , de diámetro d , estirado por una masa graduada M . Cuando se excita el electroimán por cierta corriente alterna, la cuerda empieza a vibrar fuertemente.

1° Explicar este fenómeno.

2° Determinar la frecuencia y el período de la corriente alterna excitadora.

3° Denominar la nota musical más próxima al sonido dado por el alambre, y calcular la longitud de onda correspondiente en el aire.

Datos numéricos : $l = 1$ m.; $d = 0$ mm. 2; $M = 800$ g; densidad del hierro = 7,7; intensidad de la gravedad $g = 980$; $la_3 = 435$ vibraciones completas. Se tomará $\pi = \frac{22}{7}$ y V (velocidad del sonido en el aire) = 340 m.

(*Bacc. Mathématiques*, Paris, julio 1906.)

Solución : 1° La cuerda vibra intensamente, a causa de un fenómeno de resonancia, cuando el período de las atracciones que sufre por parte del electroimán iguala a su período propio de vibraciones.

2° Frecuencia $n = 45$ (igual a la mitad de la frecuencia de las vibraciones de la cuerda); período $T = \frac{1}{45}$ de segundo.

3° $fa_{1\sharp}$, $\lambda = 3,78$ m.

LIV. — Dos tubos sonoros abiertos, idénticos, están alimentados : uno por una corriente de hidrógeno; el otro, por una corriente de oxígeno; se observa que el sonido fundamental del primero está al unísono con el cuarto armónico del segundo (contando el sonido fundamental como primer armónico). Deducir de este experimento la relación de las velocidades del sonido en el hidrógeno y en el oxígeno. Sabiendo además que estos sonidos idénticos corresponden al *la* de la cuarta gama, y que la longitud de los tubos es de 75 cm., calcular la velocidad del sonido en los dos gases. El *la* normal, es decir, el de la 3ª gama corresponde a 435 vibraciones por segundo.

(*Bacc. Mathématiques*, Caen, julio 1907.)

Solución : Sea V la velocidad del sonido en el hidrógeno y V' en el oxígeno; tenemos :

$$\frac{V}{V'} = 4, \quad V = 1270^m, 20 \frac{m}{s}. \quad V' = 317,35 \frac{m}{s}.$$

LV. — Dos tubos sonoros abiertos de la misma longitud contienen, uno aire a 0°; el otro, aire a 28°. Suponiendo que la presión de este aire sea la misma en ambos tubos, se trata de averiguar :

1° El intervalo de sus sonidos fundamentales;

2º La frecuencia de las vibraciones que producen cuando se los hace hablar simultáneamente. El primer tubo — tubo a 0º — da como sonido fundamental el do_3 , y sabemos que el la_3 corresponde a 435 vibraciones dobles por segundo.

Se toma $\frac{1}{273}$ como coeficiente de dilatación del aire.

(*Bacc. Mathématiques*, Grenoble, julio, 1906.)

Solución : 1º intervalo, 1,05;
2º número de refuerzos por segundo, 13.

ÓPTICA

LVI. — Sea 40 m. la distancia que separa la llama de un mechero de gas de la de una bujía. Se desea saber en qué punto habrá que colocar un cuerpo entre estas dos luces para que esté igualmente iluminado por cada una de ellas, suponiendo que la intensidad de la luz de la llama del gas sea 16 veces mayor que la de la bujía.

(*Bacc. Latin-sciences et Sciences-langues vivantes*, Lyon, octubre 1906.)

Solución : Hay que colocar el cuerpo a 8 m. de la bujía.

LVII. — Una bujía encendida está colocada a 1 m. 50 de un armario de espejo y exactamente en el eje del tablero reflector (el eje en cuestión es la recta normal al tablero y pasando por su centro de figura). Se hace girar el tablero 60º sobre sus bisagras. Digase :

1º Qué curva sigue la imagen de la luz mientras gira el tablero;

2º Calcular el camino recorrido por la imagen durante esta rotación;

3º Encontrar la distancia de la imagen al objeto en la nueva posición del tablero;

El tablero tiene un metro de ancho. (*Bacc. Sciences*, Clermont, julio 1911.)

Solución : 1º La imagen se mueve en una circunferencia que tiene por eje el de rotación del tablero y pasando por la bujía (radio 1,581 m.);

2º La imagen se mueve de un arco de 120º en esta circunferencia, es decir una longitud de 3,311 m.;

3º Efectuándose la rotación del tablero hacia la bujía (abriendo la puerta del armario), la distancia de la imagen al objeto ha resultado de 0,63 m.; si la rotación se hubiera efectuado en sentido inverso (cerrando la puerta) la distancia hubiese resultado de 2,36 m.

LVIII. — La llama de una bujía tiene 4 cm. de altura; está colocada perpendicularmente al eje principal de un espejo esférico cóncavo de 50 cm. de distancia focal, a 25 cm. del vértice del espejo, y de modo que la base de la llama se halle en el eje principal. Se trata de calcular :

1º A qué distancia del vértice se producirá la imagen virtual;

2º Magnitud de la imagen.

Solución : 1º $p' = 50$ cm., 2º $i = 8$ cm.

LIX. — El eje principal de un espejo de telescopio ($f = 10$ m.) se dirige hacia el sol (diámetro aparente : 32'). ¿Cuál es la magnitud lineal de la imagen real del sol?

Solución : 9 cm. 31.

LX. — La imagen real dada por un espejo cóncavo es dos veces mayor que el objeto cuando este último se halla a 0 m. 25 del foco. ¿Cuál es la distancia focal del espejo?

(*Bacc. Latin-sciences et Sciences-langues vivantes*, Chambéry, julio 1906.)

Solución : $f = 0$ m. 50.

LXI. — El índice de refracción del agua con relación al aire es $\frac{4}{3}$; el del cristal con relación al aire es $\frac{3}{2}$. ¿Cuál es el índice de refracción del cristal con relación al agua?

(*Bacc. Sciences-langues vivantes*, Grenoble, julio, 1906.)

Solución : $\frac{9}{8}$.

LXII. — Un rayo monocromático situado en la sección recta de un prisma de ángulo refringente A , incide en la cara de entrada con una incidencia i . ¿Qué valor hay que dar a i para que el rayo refractado salga normalmente en la segunda cara del prisma? Considerar los tres casos particulares :

$$A = \frac{\pi}{4}, \quad n = \sqrt{2}; \quad A = \frac{\pi}{6}, \quad n = \sqrt{2}; \quad A = \frac{\pi}{6}, \quad n = 2.$$

(*Bacc. Latin-sciences et Sciences-langues vivantes*, Toulouse, octubre 1906.)

Solución : Se debe tener seno $i = n \text{ seno } A$.

Casos particulares : $1^\circ i = \frac{\pi}{2}$; $2^\circ i = \frac{\pi}{4}$; $3^\circ i = \frac{\pi}{2}$.

LXIII. — Una lente convergente infinitamente delgada, de distancia focal $f = 20$ cm., se halla colocada encima de un vaso cilíndrico de manera que su eje sea vertical. Este eje encuentra el fondo del vaso en un punto A del cual da la lente una imagen real A'. La distancia AA' = l es de 80 cm.

En el vaso, échase agua, que forma una capa de espesor $e = 30$ cm. En estas condiciones, la imagen real del punto A que da la lente, se encuentra proyectada a una distancia $a = 12$ cm. encima de su posición primitiva A'. Deducir de este experimento el valor del índice del agua.

Nota. La lente está diaframatizada de modo que sólo admite los rayos salidos de A que forman ángulos pequeños con la vertical.

(*Bacc. Latin-sciences et Sciences-langues vivantes, Argel, octubre 1906.*)

Solución : $n = \frac{4}{3}$.

LXIV. — Una recta luminosa A de 10 cm. de longitud se halla colocada a 2 m. de una lente convergente O, perpendicularmente al eje principal de esta lente. Al otro lado de la lente obtiéndose una imagen real cuya longitud es 10 cm.

Calcúlese a qué distancia de la recta A habria que colocar la lente para que la nueva imagen tuviese 1 m. de longitud.

(*Bacc. Sciences-langues vivantes, Grenoble, julio 1906.*)

Solución : 110 cm.

LXV. — Una bujía se halla instalada a 1 metro de una pared : ¿en qué posiciones debe colocarse, entre la bujía y la pared, una lente convergente de 22 cm. de longitud focal, para producir en la pared la imagen limpida de la llama? ¿Cuál es el aumento?

(*Bacc. Latin-sciences et Sciences-langues vivantes, Nancy, julio 1906.*)

Solución : La lente debe hallarse ora a 32,68 cm. de la bujía, y en este caso el aumento es 2,06; ora a 67,32 cm., caso en que el aumento es 0,485.

LXVI. — Una lente convergente delgada de 4 dioptrías, dividida en dos partes por un plano que pase por su eje principal, da, de un orificio circular de 5 mm. de radio, cuyo centro está en el eje de la lente y el plano perpendicular a este eje, una imagen que se trata de determinar en posición y en magnitud.

Sabemos que apartando 1 mm. cada mitad de la lente, del eje primitivo y perpendicularmente a este eje, se obtienen dos imágenes tangentes del orificio.

(*Bacc. Sciences-langues vivantes, Paris, julio 1906.*)

Solución : Distancia de la imagen a la lente, 31,25 cm.

Diámetro de la imagen, 2,5 mm.

LXVII. — Los rayos emanados de un objeto inciden en una lente divergente de 50 cm. de distancia focal, colocada a 100 cm. del objeto, y luego, en una lente convergente de 25 cm. de distancia focal, situada completamente contra la lente divergente. Hallar la distancia de las lentes, suponiéndolas infinitamente delgadas, a que se formará la imagen del objeto, y cuál será la relación entre la magnitud de la imagen y la magnitud del objeto.

(*Bacc. Latin-sciences, Paris, julio 1906.*)

Solución : $1^\circ p' = 100$ cm.; $\frac{i}{o} = 1$.

LXVIII. — Un objeto AB está colocado a una distancia OA = 1 m. delante de una lente divergente D cuya potencia es de una dioptria. Detrás de la lente D se dispone una lente convergente C de dos dioptrías de potencia, de manera que coincidan los ejes de las dos lentes.

Hallar :

1° Cuál debe ser la distancia OO' de los centros ópticos de las lentes para que los rayos luminosos emanados de AB y que atraviesen el sistema óptico den una imagen real de la misma magnitud que AB.

2° Cuál será la distancia de esta imagen al objeto AB.

(*Bacc. Latin-sciences et Sciences-langues vivantes, Dijon, julio 1906.*)

Solución : $1^\circ OO' = 0,25$ m.

2° La distancia de la imagen definitiva al objeto es 2,75 m.

LXIX. — Una lente convergente de flint tiene un índice de refracción igual a 1,770 para la raya C del espectro solar y una potencia de + 10,0 dioptrías para la misma radiación.

Sabiendo que tiene por índice de refracción 1,790 para la raya F del espectro solar, hallar su distancia focal para esta misma radiación de la raya F.

A esta lente de flint se asocia una lente divergente de crown que tiene respectivamente las distancias focales 10 cm. 0 y 9 cm. 82 para la raya C y la raya F del espectro solar. Las dos lentes delgadas están acopladas, sean cuales fueren las distancias focales del sistema para las rayas C y F.

(*Bacc. Sciences-langues vivantes*, Paris, julio 1907.)

Solución : 1° $f = 9\text{cm},6$; 2° $F_c = \infty$; $Ff = 517$ cm.

LXX. — La distancia más próxima a su ojo a que una persona puede distinguir claramente los objetos es de 10 cm. Colocando contra el ojo una lente, esta distancia mínima de vision distinta retrocede a 20 cm. ¿Cuál es, en dioptrías, la convergencia (positiva o negativa) de dicha lente?

(*Bacc. Latin-sciences et Sciences-langues vivantes*, Poitiers, octubre 1906.)

Solución : 5 dioptrías.

LXXI. — Un presbita cuya distancia mínima de visión distinta es 1 m. 20 quiere leer a la distancia de 30 cm.

1° ¿Cuál es la convergencia de las lentes que deberá emplear? Se las supone de espesor despreciable y colocadas absolutamente contra los ojos.

2° Si el presbita no dispone sino de lentes de 36 cm. de distancia focal, ¿a qué distancia del ojo se las deberá colocar, para ver lo mejor posible el libro situado a 30 cm. del ojo?

(*Bacc. Sciences-langues vivantes*, Paris, octubre 1907.)

Solución : 1° + 2,5 dioptrías; 2° a 2,41 cm.

LXXII. — Un rayo de luz blanca incide normalmente en la cara de entrada de un prisma. ¿Qué ángulo formarán entre sí, a la salida del prisma, el rayo rojo y el violado? El ángulo del prisma es de 15°. El índice de refracción del prisma es de 1,60 para los rayos rojos y de 1,64 para los violados.

(*Bacc. Sciences-langues vivantes*, Grenoble, julio 1907.)

Solución : 39°.

LXXIII. — Una lente simple tiene una potencia intrínseca de 50 dioptrías.

1° ¿Bajo qué ángulo se ve a través de esta lente un objeto de 1 mm. de longitud? (Cálculése este ángulo en grados y fracciones de grado.)

2° Se emplea esta lente como ocular de un microscopio cuyo objetivo es una lente de convergencia igual a 100 dioptrías. ¿A qué distancia hay que colocar las dos lentes del microscopio para que su potencia sea de 1 000 dioptrías?

(Cálculése esta potencia en el caso de un ojo infinitamente presbita colocado en el foco posterior del ocular.)

(*Bacc. Latin-sciences et Sciences-langues vivantes*, Marseille, julio 1906.)

Solución : 1° 2°,865.

2° 23 cm.

LXXIV. — Un anteojo astronómico se halla primeramente colocado para ver claramente al infinito; luego, se mira a un objeto con el mismo anteojo y en iguales condiciones; y se observa que para verlo claramente hay que aumentar 1 cm. la distancia focal entre el ocular y el objetivo. ¿A qué distancia se halla este objeto? La distancia focal del objetivo es de 120 cm.

(*Bacc. Latin-sciences et Sciences-langues vivantes*, Caen, julio 1907.)

Solución : 145,20 m.

LXXV. — Con un aparato fotográfico cuyo objetivo tiene una distancia focal principal de 10 cm. se obtiene la imagen de una regla graduada en centímetros colocada a 10,1 metros de distancia. ¿Cuál es la distancia de los trazos de la imagen de la regla?

(*Bacc. Latin-sciences et Sciences-langues vivantes*, Besançon, julio 1906.)

Solución : 0,1 milímetro.

LXXVI. — Un aparato fotográfico tiene un objetivo compuesto de dos lentes sumamente delgadas L_1 , L_2 , de igual convergencia 4 dioptrías, y colocadas a 5 cm. una de otra. Se retira la lente L_2 la más inmediata al vidrio sin pulimento V del aparato, y se enfoca en este vidrio la imagen de un objeto muy lejano.

Para fotografiar un objeto AB perpendicular al eje principal del objetivo y de altura 10 cm, se vuelve a colocar en su sitio la lente L_2 .

Se pregunta :

1° A qué distancia de la lente L, se debe colocar el objeto para que su imagen se forme claramente en el vidrio sin pulimento, sin que haya necesidad de modificar la distancia de éste al objetivo;

2° La altura de la imagen de AB así obtenida.

(*Bacc. Sciences-langues vivantes*, París, julio 1912.)

Solución : 1° 32,81 cm.

2° 6,4 cm.

ELECTRÓLISIS

LXXVII. — En un mismo circuito recorrido por una corriente están dos vasos de electrolisis. Uno de ellos contiene sulfato de cobre, el otro, sulfato de cinc. Al cabo de veinte minutos, quedan depositados 2,03 gr. de cobre. ¿Cuál es el peso del zinc depositado en una hora?

Solución : 6,25 gr.

LXXVIII. — Se desea saber cuál es la intensidad de una corriente que, recorriendo un voltámetro de sulfato de cobre y electrodos de cobre, durante veinte minutos, hará depositar en la lámina cátodo una masa de cobre igual a 3,95 gramos.

Peso atómico del cobre 63,6.

(*Bacc. Latin-sciences et Sciences-langues vivantes*, Besançon, julio 1907.)

Solución : 10 amperios.

LEYES DE LA CORRIENTE

LXXIX. — Una resistencia de 100 ohmios se sumerge en el agua de un calorímetro; durante 2 minutos y 48 s. es recorrida por una corriente de medio amperio. ¿Cuál es la elevación de temperatura del calorímetro, sabiendo que el peso en agua de éste es 1008 gr. y que la destrucción de un julio produce 0,24 de caloría?

Se considera despreciable el calor perdido por la irradiación del calorímetro.

(*Bacc. Latin-sciences et Sciences-langues vivantes*, Toulouse, julio 1906.)

Solución : 1°.

LXXX. — Calcular a qué precio resulta calentar eléctricamente un baño de 200 litros de agua, de 10° a 40°, suponiendo que toda la energía eléctrica se ha transformado en calor recibido enteramente por el agua. El precio de coste del hectovatio-hora es 0 fr. 08.

Solución : La cantidad de calor necesaria es

$$200\ 000 (40 - 10) = 6\ 000\ 000 \text{ calorías,}$$

equivalente a

$$6\ 000\ 000 \times 4.18 = 25\ 080\ 000 \text{ julios.}$$

Por otra parte, 1 hectovatio-hora vale $100 \times 3\ 600 = 360\ 000$ julios. Serán menester pues

$$\frac{25\ 080\ 000}{360\ 000} = 69,66 \text{ hectovátios-hora,}$$

cuyo precio es $69,66 \times 0,08 = 5 \text{ fr. } 57.$

LXXXI. — En un calorímetro lleno de agua se coloca una lámpara de incandescencia de 220 voltios, en la cual pasa una corriente de 0,4 amperios.

¿Cuánto tiempo tardará el agua en llegar a la temperatura de 20°? Sabemos : 1° que la temperatura inicial del agua es de 15°; 2° que el peso en agua total del calorímetro, de la lámpara y del agua es de 500 g. Un julio vale 0,245 de pequeña caloría.

Admitase que no hay pérdida de calor por irradiación.

(*Bacc. Latin-sciences et Sciences-langues vivantes*, Nancy, octubre 1906.)

Solución : $t = 116$ segundos.

LXXXII. — En funcionamiento normal, una lámpara de incandescencia de 16 bujías está recorrida por una corriente de 0,25 amperios bajo una diferencia de potencial de 220 voltios. ¿Cuánto cuesta el alumbrado de esa lámpara por hora, sabiendo que el hectovatio-hora se vende a 0,06 francos.

(*Bacc. Sciences-langues vivantes*, Besançon, octubre 1906.)

Solución : La potencia exigida por la lámpara es $220 \times 0,25 = 55$ vatios. La energía consumida por hora es, pues, 55 vatios-hora, o 0,55 hectovatios-hora, que valen $0,55 \times 0,06 = 0$ fr. 033.

LXXXIII. — 10 lámparas de filamento de carbón, de 16 bujías de intensidad, que exigen 0,5 amperio, están colocadas en derivación entre dos cables que tienen una diferencia de potenciales constante de 110 voltios. Calcular el precio de esta luz, en un mes de 30 días, alumbrando, por término medio, 4 horas por día. Precio del hectovatio-hora 0 fr. 08.

Solución : 52 fr. 80.

LXXXIV. — Calcular la resistencia de un alambre telegráfico de hierro (resistividad 0,000 009 ohmio-cm.), de 100 km. de largo y 4 mm. de diámetro.

Solución : La sección del alambre es $\pi \times 0,2^2$ cm², su longitud 10 000 000 cm. Su resistencia es pues.

$$0,000\ 009 \times \frac{10\ 000\ 000}{\pi \times 0,2^2} = 716 \text{ ohmios.}$$

LXXXV. — 1° Calcular la resistencia de un alambre de hierro de 600 km. de largo y de 5 mm. de diámetro, sabiendo que un alambre de 50 cm. de largo y 3,75 gr. de peso, tiene una resistencia de 0,06 ohmio; la densidad del hierro es 7,5.

2° Calcular la cantidad de calor que una corriente de 0,1 amperio desprende en una hora en este alambre. Calcular las mismas cantidades siendo la corriente de 10 amperios.

3° Cuál sería, en ambos casos, la potencia en caballos-vapor necesaria para producir el calor desprendido en el hilo.

(*Bacc. Sciences-langues vivantes*, Toulouse, julio 1910.)

Solución : 1° 3 670 ohmios;

2° 31,7 y 317 000 grandes calorías;

3° 0,05 caballo-vapor y 500 caballos-vapor.

LXXXVI. — Un tubo de cristal exactamente cilíndrico contiene 1 359 g. 6 de mercurio a 0°. Su resistencia eléctrica es de 1 ohmio a la temperatura de 0°. ¿Cuáles son la longitud y la sección de este tubo?

El tubo, mantenido a 0°, se halla colocado en derivación en una resistencia de 9 ohmios, en la cual una corriente entretiene un consumo de energía de 1 julio por segundo. Se modifica la resistencia del circuito principal de modo que en él vuelva la intensidad a su valor primitivo.

¿Cuál será entonces la cantidad de energía consumida por segundo en la columna de mercurio?

Densidad del mercurio a 0° = 13,596.

Se considera el ohmio como representado por una columna cilíndrica de mercurio a 0° que tiene 106,3 cm. de longitud y contiene 14,4521 g. de mercurio.

(*Bacc. Sciences-langues vivantes*, Paris, julio 1907.)

Solución : 1° $l = 1031$ cm., $s = 0,097$ cm².

2° 0,09 julios.

LXXXVII. — La resistencia de la pila en un circuito es 5 ohmios; su fuerza electromotriz, 2 voltios y la resistencia del circuito exterior, 24 ohmios.

Hallar la intensidad de la corriente y la diferencia de potencial en los polos de la pila.

(*Bacc. Latin-sciences et Sciences-langues vivantes*, Lyon, julio 1907.)

Solución : La intensidad de la corriente iguala la fuerza electromotriz, 2 voltios, dividida por la resistencia total $5 + 24 = 29$ ohmios : luego es

$$i = \frac{2}{29} = 0,069 \text{ amperio.}$$

La diferencia de potenciales pedida es la que existe entre los extremos del alambre de resistencia 24 ohmios, recorrida por la corriente $\frac{2}{29}$ amperio; por consiguiente es

$$\frac{24 \times 2}{29} = 1,65 \text{ voltio.}$$

LXXXVIII. — La diferencia de potenciales entre los polos de una pila está reducida a los $\frac{4}{5}$ del valor que representa en circuito abierto, cuando se unen los polos por un

alambre de resistencia de 18 ohmios. Calcular la resistencia interior de la pila.
(*Bacc. Latin-sciences et Sciences-langues vivantes, Aix-Marsella, julio 1907.*)

Solución : $V = 4.5$ ohmios.

LXXXIX. — Se disponen 80 elementos de pila idénticos entre si, cada uno de los cuales tiene una fuerza electromotriz de 2 voltios y una resistencia interior de 0,25 ohmios. De todos los modos de unión de estos elementos, ¿cuál es el que debe adoptarse para obtener la mayor potencia eléctrica posible, en un conductor exterior de resistencia igual a 0,8 ohmios?

¿Cuál es el valor de esta potencia eléctrica máxima?

(*Bacc. Latin-sciences et Sciences-langues vivantes, Dijon, octubre 1906.*)

Solución : 1º El problema consiste en buscar la asociación de los elementos que da la mayor intensidad de corriente.

Ahora bien, si llamamos n el número total de elementos, divididos en p series de q elementos, r la resistencia exterior, r' la resistencia de cada elemento, tenemos

$$i = \frac{ne}{qr' + pr} \quad [1]$$

Se sabe que i es máximo cuando

$$qr' = pr \quad \text{o} \quad 0,25q = 0,8p \quad [2]$$

Se tiene además

$$pq = n \quad \text{o} \quad pq = 80 \quad [3]$$

De las ecuaciones 2 y 3 se deduce $p = 5$, $q = 16$; luego se deben asociar en paralelo 5 series de 16 elementos cada una.

2º La intensidad máxima de la corriente es

$$im = \frac{80 \times 2}{0,25 \times 16 + 0,8 \times 5} = 20 \text{ amperios,}$$

que, en el conductor de resistencia 0,8 ohmio, da una potencia

$$0,8 \cdot 20^2 = 320 \text{ vatios.}$$

XC. — Una instalación eléctrica comprende una batería cuya fuerza electromotriz es 50 voltios y la resistencia interior 15 ohmios, un alambre de línea de 80 ohmios, un receptor de 5 ohmios; las comunicaciones con el suelo son excelentes, es decir equivalen a la introducción en el circuito de una resistencia despreciable.

Bruscamente, por causa de un accidente, al establecer en cierta parte de la línea una comunicación con el suelo, cuya resistencia es x ohmios, se nota que la intensidad en la estación transmisora viene a ser 0,84 amperio y en la estación receptora, 0,084 amperio.

Encontrar la posición del accidente y la resistencia x .

(*Bacc. Sciences-langues vivantes, Paris, julio 1912.*)

Solución : 1º El accidente se produjo en medio de la línea;

2º $x = 5$ ohmios.

MAGNETISMO. — ELECTROMAGNETISMO

XCI. — Una aguja de inclinación bien construída forma un ángulo de 65° con el horizonte, cuando está colocada en el plano del meridiano magnético. Entonces, en el extremo sur se ata un alambre delgado que termine en un peso tal que alambre y peso pesen 5 decigramos. Al tomar la aguja nueva posición ya no forma con el horizonte sino un ángulo de 60°. ¿Qué peso hay que suspender para que la aguja quede horizontal?

Solución : $p = 2,6$ g.

XCII. — En un bastidor circular plano de 1 m. de diámetro y cuyo plano está en el meridiano magnético, se enrollan 50 vueltas de alambre de cobre aislado, por el cual se hace pasar una corriente de intensidad no conocida. En el centro del bastidor hay móvil alrededor de un eje vertical, una pequeña aguja magnética que, por la acción de la corriente, desvía de su primitiva posición de equilibrio y se fija en otra posición haciendo 12° 30' con la primera. Hallar la intensidad de la corriente en amperios.

Intensidad de la componente horizontal del campo terrestre : $H = 0,19$.

Solución : Ya sabemos que la desviación está dada por la fórmula $\text{tg } \alpha = \frac{H'}{H}$, siendo

H' la intensidad del campo de la corriente. Cada espira produce un campo $\frac{2\pi i}{10R}$, o $\frac{2\pi i}{10 \times 50}$ gauss; luego las 50 espiras producen un campo

$$H' = \frac{2\pi i \times 50}{10 \times 50} = \frac{2\pi i}{10} \text{ gauss.}$$

Se tiene pues,

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2\pi i}{10 H}, \quad \text{de donde} \quad i = \frac{10 H \operatorname{tg} \alpha}{2\pi}.$$

Reemplazando α por $12^\circ 30'$ y H por 0,19, se tiene $i = 0,067$ amperio.

XCIII. — En un carrito largo de eje perpendicular al meridiano magnético, se ha enrollado regularmente un alambre conductor aislado, a razón de 455 vueltas en una longitud de generatriz de 51,2 cm. En el interior del carrito se mueve, alrededor de un eje vertical, una aguja magnética que se fija en el meridiano magnético. Se lanza una corriente al carrito y la aguja adquiere una nueva posición de equilibrio que forma $8^\circ 20'$ con la primera. Calcular la intensidad de la corriente.

Solución: 0,0025 amperios.

XCIV. — Un alambre conductor horizontal móvil, de 5 cm. de longitud, recorrido por una corriente de 10 amperios, hállese colocado en un campo magnético uniforme de 100 unidades C.G.S., perpendicularmente a las líneas de fuerzas horizontales de este campo. Está suspendido del platillo de una balanza, de tal modo que la fuerza a que se halla sometido en el campo magnético se dirija de abajo arriba. Evaluar esta fuerza en dinas y el peso que debe colocarse en el platillo para que el fiel vuelva a la posición de equilibrio que tiene cuando no pasa ninguna corriente por el alambre.

Intensidad de la gravedad: 981 C.G.S.

Solución: 1º 500 dinas.
2º 0,51 gramos.

INDUCCIÓN. — TRANSPORTE DE LA ENERGÍA. CORRIENTES ALTERNAS

XCIV. — Una máquina transforma en energía eléctrica útil las 8 décimas partes de la energía que le proporciona una máquina hidráulica; aquella envía una corriente de 30 amperios a un motor eléctrico situado a cierta distancia; la resistencia eléctrica total de los alambres de unión es 2 ohmios, y la diferencia de potencial en los bornes de la máquina es 400 voltios; sabiendo que el motor eléctrico transforma en trabajo mecánico útil las 8 décimas de la energía eléctrica que recibe, averiguar el rendimiento de este transporte de energía, es decir, la relación entre el trabajo mecánico útil producido por el motor y la energía que la máquina hidráulica proporciona durante el mismo tiempo a la máquina. (*Bacc. Sciences-langues vivantes, Caen, octubre 1906.*)

Solución: La potencia eléctrica dada por la máquina es

$$V_i = 400 \times 30 = 12\,000 \text{ vatios.}$$

Si P es la potencia que la máquina motriz le suministra, se tiene

$$P \times 0,8 = 12\,000, \quad \text{de donde} \quad P = \frac{12\,000}{0,8} = 15\,000 \text{ vatios.}$$

La pérdida de energía en los alambres es $r i^2 = 2 \times 900 = 1\,800$ julios por segundo. Luego la potencia recibida por el motor sólo es $12\,000 - 1\,800 = 10\,200$ vatios.

El rendimiento total es

$$\frac{8\,160}{P} \quad \text{o} \quad \frac{8\,160}{15\,000} = 0,544.$$

XCVI. — Una instalación eléctrica ramificada en la canalización de un sector urbano de 110 voltios continuos comprende:

1º 100 lámparas de incandescencia de 16 bujías 110 voltios, las cuales consumen 3,3 vatios por bujía;

2º Un motor eléctrico de resistencia 0,5 ohmios que hace disponible una potencia de 3 872 vatios, o sea 80 p. 100 de la potencia eléctrica que absorbe (admítase que la pérdida 20 p. 100 se atribuye, totalmente, a la disipación por el efecto Joule).

a) Calcular la intensidad que consume el primer circuito;

b) Calcular la intensidad de la corriente en el 2º caso: 1º hallándose en reposo 1

motor; 2º estando en marcha; y la fuerza electromotriz engendrada por inducción en su armadura. (*Bacc. Latin-sciences et Sciences-langues vivantes, Argel, julio 1906.*)

Solución : a) 48 amperios.

b) 1º 220 amperios; 2º intensidad de la corriente 44 amperios; fuerza contraelectromotriz del motor, 88 voltios.

XCVII. — En un transformador de descenso de tensión, el enrollamiento primario comprende 10 000 vueltas de alambre; el secundario, 400 solamente. Se entretiene entre los bornes del primario una diferencia de potencial eficaz de 3 000 voltios que produce una corriente alterna cuya intensidad eficaz es de 4 amperios.

Suponiendo que no haya ninguna pérdida de energía en la transformación, se desea saber :

1º La fuerza electromotriz eficaz entre los dos bornes del secundario;

2º La potencia en vatios disponible en los dos mismos bornes.

(*Bacc. Mathématiques, Grenoble, julio 1906.*)

Solución : 1º Se sabe que los voltajes V_2 y V_1 ($= 3\,000$) en los bornes del secundario y del primario son proporcionales a los números de espiras de estos circuitos. Se tiene pues

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{400}{10\,000}, \quad \text{de donde} \quad \frac{V_2}{3\,000} = \frac{400}{10\,000}, \quad \text{de donde} \quad V_2 = 120 \text{ voltios.}$$

2º La potencia recogida en el secundario, siendo la misma que la suministrada al primario, es igual al producto del voltaje primario 3 000 por la intensidad primaria 4. Luego es $3\,000 \times 4 = 12\,000$ vatios.

XCVIII. — Nos proponemos aprovechar a distancia la energía de un salto de agua de 10 m. que da 1 500 litros por segundo. A este efecto, se emplea un motor hidráulico que acciona un alternador. El alternador está en relación por una línea con el primario de un transformador, en cuyos bornes se mantiene una fuerza electromotriz eficaz de 3 300 voltios. El voltaje en los bornes del secundario es de 110 voltios. El primario cuenta 1 500 vueltas de alambre. Hallar :

1º El número de vueltas del alambre del secundario;

2º La potencia disponible en los bornes del secundario;

3º El número de lámparas de 25 bujías que consuman 0,8 amperios por cada 110 voltios, que puede alimentar el transformador.

Rendimiento del motor hidráulico	0,75
— del alternador	0,90
— del transformador.	0,95

Pérdida de energía en la línea (efecto Joule): 10 p. 100 de la energía proporcionada por el alternador. (*Bacc. Mathématiques, Argel, julio 1907.*)

Solución : 1º 50 vueltas.

2º 85 000 vatios.

3º 965 lámparas.

LEY DE COULOMB. — CAPACIDAD ELÉCTRICA. — ENERGÍA. ELECTROESTÁTICA

XCIX. — Dos péndulos eléctricos de longitud l cm. y de peso p dinas, primeramente en contacto, se cargan de una misma cantidad de electricidad; entonces se apartan de la vertical y cada uno forma un ángulo α con esta dirección. Calcúlese la carga x de cada bola, despreciando el peso del hilo.

Solución : $x = 2l \operatorname{sen.} \alpha \sqrt{p \operatorname{tg} \alpha}$ unidades electrostáticas.

C. — Dos pequeñas esferas idénticas, electrizadas positivamente, están colocadas a cierta distancia una de otra y originan una repulsión igual a 1; se las acerca hasta que se toquen, luego se las aleja a una distancia igual a la mitad de la precedente y se tiene una repulsión igual a 4,5. Se pregunta cuál es la proporción de las cargas eléctricas positivas m, m' de ambas esferas.

Solución : Sea d la distancia primitiva de los centros de las esferas, se tiene

$$\frac{m m'}{d^2} = 1. \tag{1}$$

Cuando se hace que las esferas se toquen entre sí, se reparten las cargas igualmente entre sí. Luego cada una ha tomado la carga $\frac{m+m'}{2}$. Entonces se tiene para la distancia $\frac{d}{2}$

$$\frac{\frac{(m+m')^2}{4}}{\frac{d^2}{4}} = 4,5 \quad \text{o} \quad \frac{(m+m')^2}{d^2} = 4,5 \quad (2)$$

Dividiendo la ecuación (2) por la ecuación (1), se tiene

$$\frac{(m+m')^2}{mm'} = 4,5 \quad \text{o} \quad \frac{m}{m'} + 2 + \frac{m'}{m} = 4,5$$

escribiendo $\frac{m}{m'} = x$, se tiene

$$x + 2 + \frac{1}{x} = 4,5 \quad \text{o} \quad x^2 - 2,5x + 1 = 0.$$

De aquí se sacan dos raíces $x' = 2$, $x'' = \frac{1}{2}$, lo cual significa que una de las dos cargas m o m' es doble de la otra.

CI. — Una esfera de 25 cm. de radio tiene un potencial 10 (unidades electrostáticas); se pone en comunicación lejana con otra esfera un conductor de potencial 6 y toma un potencial 7; calcular la capacidad C del conductor.

Solución : $C = 75$.

CII. — ¿Cuál es el trabajo necesario para cargar una esfera de 1 metro de diámetro, aislada de todo conductor, al potencial de 9 000 voltios?

Solución : 0,00 225 julios.

CIII. — Calcular la capacidad de un condensador de lámina de vidrio (poder inductor específico 5,5) que tiene 25 m. de superficie y 3 mm. de espesor.

Solución : 0,4 microfaradios.

CIV. — Se forma un circuito que comprende un galvanómetro G, una pila P de fuerza electromotriz E y una resistencia A. Siendo R la resistencia total del circuito, nótese la desviación del galvanómetro.

Se suprime la resistencia A, establécese entre la pila y el galvanómetro un condensador C, una de cuyas armaduras está provista de una lámina vibrante que lo cierra alternativamente contra la pila y contra el galvanómetro. La lámina produce N vibraciones por segundo. Se desea saber :

1° La intensidad de la corriente en ambos casos;

2° Siendo la desviación del galvanómetro la misma en los dos casos, deducir de ella la capacidad del condensador en microfaradios.

Aplicación : $N = 20$, $R = 50\,000$ ohmios.

(Bacc. Latin-sciences, Caen, octubre 1906.)

Solución : 1er caso : $i = \frac{E}{R}$; 2º caso $i = NCE \times 10^{-6}$ (Capacidad del condensador en microfaradios).
2º $C = 1$ microfaradio.

CV. — Dos alambres de resistencias R y R' se hallan fijos por sus extremos a los polos de una batería de acumuladores de una fuerza electromotriz total E y de resistencia despreciable. Una de las armaduras de un condensador de capacidad C está unida metálicamente al centro de la resistencia R y la otra armadura, a un punto que divide la resistencia R' en dos partes que se hallan en la relación x.

Se trata :

1º De calcular las intensidades i e i' de las corrientes que siguen los dos alambres;

2º De estudiar cómo varía la carga del condensador con x.

Aplicación numérica :

$R' = 100$ ohmios; $R = 150$ ohmios; $E = 40$ voltios; $C = 1$ microfaradio, $x = \frac{3}{4}$.

(Bacc. Sciences-langues vivantes, Paris, octubre 1806.)

Solución : 1° $i = \frac{E}{R}$; $i' = \frac{E}{R'}$.

2° $Q = \frac{CE}{2} \frac{1-x}{1+x}$.

La carga de una de las armaduras varía de $+\frac{CE}{2}$ a $-\frac{CE}{2}$ cuando x varía de 0 a ∞ ; es nula cuando $x = 1$, es decir, cuando el punto de unión del alambre contra la resistencia R' la divide en partes iguales.

Aplicación numérica: $i = 0,4$ amperios; $i' = 0,366$ amperios; $Q = 0,00000285$ culombios

PRINCIPALES CONSTANTES FÍSICAS

CUERPOS SÓLIDOS Y LÍQUIDOS

I. Densidades y dilataciones.

SUBSTANCIAS	ESTADO FÍSICO	DENSIDADES A DIVERSAS TEMPERATURAS		COEFICIENTES DE DILATACIÓN LINEAL	COEFICIENTES DE DILATACIÓN CÚBICA
		Temperaturas.	Densidades.		
Acero duro (0,01 C) . . .	sólido	ambiente	7,83	12×10^{-6}	36×10^{-6}
— muy dulce . . .	sól.	id.	7,85	$11,8 \times 10^{-6}$	$35,4 \times 10^{-6}$
Acero invar (0,36 Ni; 0,002 C)	sól.	id.	8,0	$0,8 \times 10^{-6}$	$2,4 \times 10^{-6}$
Agua	líq.	— 10°	0,99815	. . . . .	. . . . .
	id.	0°	0,99987	. . . . .	. . . . .
	id.	2°	0,9997	. . . . .	. . . . .
	id.	4°	1,0000	. . . . .	. . . . .
	id.	6°	0,9997	. . . . .	. . . . .
	id.	8°	0,99987	. . . . .	. . . . .
	id.	10°	0,99973	. . . . .	. . . . .
	id.	20°	0,99823	. . . . .	. . . . .
	id.	30°	0,99567	. . . . .	. . . . .
	id.	40°	0,99221	. . . . .	. . . . .
	id.	50°	0,98807	. . . . .	. . . . .
	id.	100°	0,95838	. . . . .	. . . . .
Alcohol etílico.	id.	15°	0,794	. . . . .	110×10^{-5}
— metílico.	id.	20°	0,795	. . . . .	126×10^{-5}
Aluminio puro.	sól.	4°	2,58	22×10^{-6}	66×10^{-6}
Bencina.	líq.	0°	0,899	. . . . .	124×10^{-5}
Carbono diamante.	sól.	. . . . .	3,0 a 3,55	$0,6 \times 10^{-6}$	$1,8 \times 10^{-6}$
— grafito	id.	. . . . .	2,1 a 2,3	$7,46 \times 10^{-6}$	$22,4 \times 10^{-6}$
Carbono (sulfuro)	líq.	0°	1,292	. . . . .	122×10^{-5}
Carbono (tetracloruro).	id.	0°	1,632	. . . . .	124×10^{-5}
Cloroformo	id.	0°	1,526	. . . . .	127×10^{-6}
Cobre comprimido.	sól.	20°	8,94	16×10^{-6}	48×10^{-6}
Cuarzo puro.	id.	0°	2,65	. . . . .	. . . . .
Cuarzo fundido	id.	0°	2,20	$0,52 \times 10^{-6}$	$1,56 \times 10^{-6}$
Estaño blanco puro	id.	18°	7,285	21×10^{-6}	63×10^{-6}
Eter ordinario.	líq.	0°	0,736	. . . . .	162×10^{-5}
Hidrogeno.	id.	— 253°	0,07	. . . . .	. . . . .
Hielo	sól.	0°	0,9176	. . . . .	. . . . .
Hierro.	id.	. . . . .	7,85 a 7,88	$11,4 \times 10^{-6}$	$34,2 \times 10^{-6}$
— fundido	id.	amb.	7	$11,2 \times 10^{-6}$	$33,6 \times 10^{-6}$
Iridio	id.	17° 5'	22,42	$6,4 \times 10^{-6}$	$19,2 \times 10^{-6}$
Latón (0,67 Cu; 0,33 Zn)	id.	amb.	8,4	$18,5 \times 10^{-6}$	$55,2 \times 10^{-6}$
Magnesio	id.	5°	1,743	$24,2 \times 10^{-6}$	$72,6 \times 10^{-6}$

SUBSTANCIAS	ESTADO FÍSICO	DENSIDADES A DIVERSAS TEMPERATURAS		COEFICIENTES DE DILATACIÓN LINEAL	COEFICIENTES DE DILATACIÓN CÚBICA
		Temperaturas.	Densidades.		
Mercurio	líq.	0°	13,595		
	id.	50°	13,473		1,81 × 10 ⁻⁴ (*)
	id.	100°	13,352		1,82 × 10 ⁻⁴
	id.	200°	13,113		1,84 × 10 ⁻⁴
	id.	300°	12,875		1,86 × 10 ⁻⁴
Níquel forjado.	sól.		8,68	12,5 × 10 ⁻⁶	37,5 × 10 ⁻⁶
Oro comprimido.	id.	20°	19,268	14,3 × 10 ⁻⁶	42,9 × 10 ⁻⁶
Plata comprimada.	id.	20°	10,503	18,6 × 10 ⁻⁶	55 × 10 ⁻⁶
Platino fundido.	id.		21,4	8,9 × 10 ⁻⁶	26,7 × 10 ⁻⁶
Plomo comprimido.	id.	20°	11,317	28,3 × 10 ⁻⁶	84,9 × 10 ⁻⁶
Vidrio duro de termómetros	id.	0°	2,539	7,23 × 10 ⁻⁶	21,69 × 10 ⁻⁶
Zinc comprimido.	id.	20°	7,127	29,6 × 10 ⁻⁶	88,8 × 10 ⁻⁶

(*) Coeficientes medios entre 0° y las temperaturas indicadas.

II. Calores específicos. — Cambios de estado.

SUBSTANCIAS	CALOR ESPECÍFICO		PUNTO DE FUSIÓN	CALOR DE FUSIÓN	PUNTO DE EBULLICIÓN NORMAL	CALOR DE VAPOORIZACIÓN EN EL PUNTO DE EBULLICIÓN
	Estado físico.					
Agua	líquido	1 (a 15°)	0°	79,7	100°	538,1
Aceero ordinario.	sólido	0,11	1430°			
Alcohol etílico.	líq.	0,54 (a 0°)	— 130°		78°3	236,5
— metílico.	id.	0,56 (a 0°)	— 94°9		64°7	262
Aluminio	sól.	0,217	657°	80	1800°	
Amoniaco.			— 75°5	108	— 33°5	321
Azoe.			— 210°5		— 195°7	47,6
Bencina.	líq.	0,38 (a 0°)	5°43	30,4	80°	95
Carbono (sulfuro)	id.	0,235 (a 0°)	— 112°8		46°3	90
Carbono (tetracloruro)	id.	0,316 (a 0°)	— 22°	4,2	76°75	47
Carbónico (anhídrico)			— 57°		— 79°75	
Cloro			— 102°		— 37°6	62
Clorhidrico (ácido)			— 111°3	10,3	— 83°	99
Cloroformo	id.	0,232 (a 0°)	— 63°2	19,2	61°2	61

SUBSTANCIAS	CALOR ESPECÍFICO		PUNTO DE FUSIÓN	CALOR DE FUSIÓN	PUNTO DE EBULLICIÓN NORMAL	CALOR DE VAPO-RIZACIÓN EN EL PUNTO DE EBULLICIÓN
	Estado físico.					
Cobre	sólido	0,093	1082°		2110°	
Cuarzo	id.	0,184	1780°			
Estaño	id.	0,055	231°,5	14,6	2270°	
Eter ordinario.	liq.	0,523 (a 0°)	- 117°,6	27,4	34°,6	91
Hidrógeno.			- 259°		- 252°,8	123
Hierro	sól.	0,109	1505°	59	2450°	
— fundido.			1230°			
Iridio	id.	0,032	2360°			
Magnesio	id.	0,248	651°		1120°	
Mercurio	liq.	0,033	- 39°	2,77	357°	
Níquel.	sól.	0,109	1452°			
Oro	id.	0,031	1065°			
Oxígeno.			< - 233°		- 181°,4	55,5
Plata	sól.	0,056	960°	25	1955°	
Platino	id.	0,322	1750°			
Plomo.	id.	0,0306	327°		1525°	
Sulfhídrico (ácido).			- 86°	18,8	- 63°,5	46,8
Sulfuroso (anhidrido).			- 72°,7		- 10°	95,3
Tántalo			2798°			
Tungsteno.			2900°			
Vidrio duro.	sól.	0,187				
Zinc	id.	0,092	418°		918°	

III. Resistividad de los sólidos, de los líquidos y de las soluciones.

SUBSTANCIAS	ESTADO FÍSICO	TEMPERATURA	CONCENTRACIÓN	RESISTIVIDAD EN OHMIO-CM
Aceite empleado en los transformadores.	líquido	ambiente		1 a 10×10^{-12}
Acero (0,011 C) recocido.	sólido	15°		18×10^{-6}
Acero invar.	id.	0°		75×10^{-6}
Acético (ácido)	disuelto	18°	0,10	654,5
Aleación fusible de corta-circuitos (0,33 Sn; 0,66 Pb).	sól.	15°		16×10^{-6}
Aluminio	id.	0°		$2,8 \times 10^{-6}$
Azufre octaédrico.	id.	amb.		Conductibilidad inapreciable.
Bronce fosforoso (líneas telegráficas y telefónicas)	id.	0°		$1,7 a 2 \times 10^{-4}$
Carbón para lámparas de arco	id.	amb.		$5 a 9 \times 10^{-3}$

SUBSTANCIAS	ESTADO FÍSICO	TEMPERATURA	CONCENTRACIÓN	RESISTIVIDAD EN OHMIO-CM
Carbón de filamento de lámparas de incandescencia.	sólido	en frío	. . . . .	6×10^{-3}
Carbón de filamento de lámparas de incandescencia.	id.	1700°	. . . . .	4×10^{-3}
Caucho vulcanizado.	id.	17°	. . . . .	10^{-15}
Clorhídrico (ácido).	disuelto	18°	0,10	1,586
Cloruro de calcio.	fundido	750°	. . . . .	0,862
id.	disuelto	18°	0,10	8,79
Cloruro de potasio.	fundido	750°	0,10	0,559
id.	disuelto	18°	0,10	7,35
Cloruro de sodio.	fundido	750°	. . . . .	0,294
id.	disuelto	18°	0,10	8,325
Cobre electrolítico.	sól.	0°	. . . . .	$1,54 \times 10^{-6}$
Cobre industrial.	id.	0°	. . . . .	$1,7 \times 10^{-6}$
Constantano (0,60 Cu; 0,40 Ni).	id.	18°	. . . . .	49×10^{-6}
Ebonita.	id.	amb.	. . . . .	$2 \text{ a } 30 \times 10^{-15}$
Hielo puro.	id.	-1°	. . . . .	5×10^{-9}
Hierro puro comercial.	id.	0°	. . . . .	$10 \text{ a } 12 \times 10^{-6}$
Hierro-Niquel (0,74 Fe; 0,25 Ni; 0,008 C).	id.	20°	. . . . .	80×10^{-6}
Goma laca.	id.	amb.	. . . . .	9×10^{-15}
Gutapercha.	id.	20°	. . . . .	$1 \text{ a } 100 \times 10^{-13}$
Latón (0,66 Cu; 0,34 Zn).	id.	15°	. . . . .	$5,5 \times 10^{-6}$
Magnesio.	id.	0°	. . . . .	$4,3 \times 10^{-6}$
Maillechort (composición variable).	id.	amb.	. . . . .	$22 \text{ a } 43 \times 10^{-6}$
Manganino (0,84 Cu; 0,12 Mn; 0,04 Ni).	id.	18°	. . . . .	42×10^{-6}
Mercurio.	líq.	0°	. . . . .	$91,076 \times 10^{-6}$
Mica.	sól.	amb.	. . . . .	$5 \text{ a } 10 \times 10^{-13}$
Niquel.	id.	0°	. . . . .	10×10^{-6}
Nitrato de plata.	disuelto	18°	0,10	21
Nítrico (ácido).	id.	18°	0,121	1,841
Oro.	sól.	0°	. . . . .	$2,1 \times 10^{-6}$
Parafina.	id.	amb.	. . . . .	$3 \text{ a } 300 \times 10^{-16}$
Plata.	id.	0°	. . . . .	$1,5 \times 10^{-6}$
Platino.	id.	0°	. . . . .	11×10^{-6}
Plomo.	id.	0°	. . . . .	$19,5 \times 10^{-6}$
Petróleo.	líq.	amb.	. . . . .	2×10^{-16}
Potasa.	disuelta	18°	0,126	2,656
Porcelana.	sól.	50°	. . . . .	2×10^{-15}
Sosa.	disuelta	18°	0,10	3,198
Sulfúrico (ácido).	disuelto	18°	0,10	2,657
Sulfato de cobre.	id.	18°	0,10	31,2
Sulfato de cinc.	id.	18°	0,10	31,15
Tántalo.	sól.	amb.	. . . . .	$13 \text{ a } 16 \times 10^{-6}$
Id. incandescente (1800° a 2000°).	id.	. . . . .	. . . . .	$80 \text{ a } 90 \times 10^{-6}$
Tungsteno.	id.	amb.	. . . . .	$6 \text{ a } 8 \times 10^{-6}$
Id. incandescente (2000° a 2330°).	id.	. . . . .	. . . . .	$70 \text{ a } 90 \times 10^{-6}$
Vidrio ordinario.	id.	20°	. . . . .	9×10^{-13}
Zinc.	id.	0°	. . . . .	$5,7 \times 10^{-6}$

CUERPOS GASEOSOS

SUBSTANCIAS	DENSIDAD CON RELACION AL AIRE		CALOR ESPECIFICO A PRESION CONSTANTE	IGUALDAD C - c	CONSTANTES CRITICAS		
	Temperatura y presión.	Densidades.			Temperatura critica.	Presion critica.	Densidad critica absoluta.
Agua	100° — 76cm	0,6298	0,435	1,32	+ 365°	200,5	0,329
Id.	100° — 5cm	0,6226					
Acetileno	0° — 76cm	0,9056		1,26	+ 35° 5	61,6 atm.	0,231
Aire		1	0,241	1,40			
Alcohol etílico	100° — 76cm	1,613	0,453	1,14	+ 213° 1	63	0,275
Amoniaco	0° — 76cm	0,5962	0,508	1,34	+ 132° 3	109,6	
Azoo	0° — 76cm	0,9672	0,242		+ 145° 1	33,6	0,327
Carbónico (anhidrido)	0° — 76cm	1,5288	0,202	1,29	+ 31° 35	72,9	0,461
Cloro	0° — 76cm	2,491		1,32	+ 146°	93,5	0,547
Id.	440° — 76cm	2,448					
Clorhidrico (ácido)	0° — 76cm	1,2681	0,185	1,39	+ 52°	83	
Eter ordinario	100° — 76cm	2,586	0,480	1,09	+ 193° 8	35,60	0,262
Etileno	0° — 76cm	0,978	0,388	1,25	+ 9° 5	50,7	0,210
Hidrógeno	0° — 76cm	0,06948	3,41	1,38	— 241°	19,4	0,033
Metano	0° — 76cm	0,5514	0,593	1,31	— 81° 8	54,9	
Nitroso (óxido)	0° — 76cm	1,5301	0,212	1,32	+ 36° 5	71,9	0,451
Nitrico (ácido)	0° — 76cm	1,0366	0,232		— 93° 5	71,2	0,524
Oxígeno	0° — 76cm	1,1053	0,218	1,40	— 118° 8	50,8	0,430
Sulfúrico (ácido)	0° — 76cm	1,1895	0,243		+ 100°	90	
Sulfuroso (anhidrido)	0° — 76cm	2,2639	0,151	1,32	+ 157° 2	78	0,520
Id.	800° — 76cm	2,2145					

TABLA ALFABÉTICA

(Entiéndase que los números se refieren á los párrafos y no á las páginas.)

A

- Aberraciones** : - de los espejos, 501; - de esfericidad de las lentes, 551; - de refrangibilidad de las lentes, 551, 613; - de la vista, 562.
- Aberroscopio** : 562.
- Absorbente (poder -)** : 629.
- Absorción de las radiaciones por los cuerpos** : 628 y sigtes; espectros de - 630.
- Acción y reacción (Principio de Newton)** : 25.
- Aceleración** : - en un movimiento rectilíneo uniformemente variado, unidad de -, 62; - en un movimiento rectilíneo cualquiera, 63; - en un movimiento curvilíneo, 64; - en un movimiento circular uniforme, 65; - proporcionalidad entre las - y las fuerzas, 76; - dimensiones de una aceleración, 1093.
- Aceleración de la caída de los cuerpos** : Definición de la -, 70; medida de la, 111 (Véase *Intensidad de la gravedad*).
- Acero** : Propiedades magnéticas del -, 828.
- Acomodación del ojo** : 558; mecanismo del -, 561.
- Acordes** : 408.
- Acromasia** : 567.
- Acromatismo** : 604.
- Acumuladores eléctricos** : Principio de los -, 745; formación de los -, 746; - ligeros - Edison, 750; empleo de los - en los tranvías, 1013; empleo de los - en los automóviles, 1015.
- Acumuladores hidráulicos** : 130.
- Actinio** : 974, 980.
- Actinometría, actinómetro** : 1072.
- Acústica** : 399 y sigtes.
- Acústica de las salas** : 425.
- Adherencia** : 217.
- Adiabáticas** : Transformaciones -, 314, 319; curvas -, 319; variaciones de temperatura en la compresión y la dilatación de un gas, 368.
- Aeronautas** : 185.
- Aeronáutica** : 185.
- Aeroplanos** : 187.
- Aeróstatos** : Definición de los -, montgolfieras y globos, 183; teoría de los -, fuerza ascensional, 184; - dirigibles, 185; sondas aéreas, 186.
- Afaquia** : 559.
- Aguas corrientes** : 135.
- Agudeza visual** : 565.
- Agujas magnéticas** : 690; - astáticas, 808.
- Aguja termoeléctrica** : 241.
- Aire comprimido** : Producción del -, 198 y sigtes; recipientes de -, 200; motores de -, 202; aplicaciones del - al correo neumático, a los relojes neumáticos, a los frenos por -, 202; a los trabajos submarinos, cámaras de -, 203.
- Aire líquido** : Producción del -, 310; conservación y transporte del - 311; aplicaciones del -, 196, 313.
- Aisladores (Cuerpos -)** : 716 (Véase *Dielectricos*).
- Aislamiento térmico** : 381.
- Alambique** : 306.
- Alcoholímetro centesimal de Gay-Lussac** : 149.
- Alisios** : 1048.
- Alternadores** : - de corrientes alternas simples, 855; de varias fases, 866.
- Altura de un sonido** : Definición de la -, 399; causa de la -, 402; medida de la -, 406.
- Alumbrado** : Aplicación de las leyes de la irradiación al -, 621, 622; - por medio de la incandescencia por el gas, 621.

- Alumbrado eléctrico** : - por lámparas de incandescencia, 999 y sigtes. ; - por lámparas de arco, 1002 y sigtes. ; - por lámparas de luminiscencia, 1007.
- Amortiguamiento de las oscilaciones** : - de las balanzas, 53; - de los galvanómetros, 836.
- Ampère** : Regla de - acerca de las acciones electromagnéticas, 787; teoría de - sobre el magnetismo, 831.
- Amperímetros** : 817.
- Amperio** (unidad práctica de intensidad de la corriente) : 715; definición electrolítica del -, 731; definición electromagnética del -, 793.
- Amperio vuelta** : 826.
- Ampliaciones fotográficas** : 655.
- Amplificador audiométrico** : 422.
- Amplitudes** : - de las oscilaciones de un péndulo, 103, 104; - de las vibraciones, 392.
- Ampolla de Marey** : 395.
- Anaglifos** : 658.
- Análisis de los sonidos** : 450 y sigtes.
- Análisis espectral** : 623 y sigtes -; aplicación del - al estudio de la constitución y de los movimientos de los astros, 633, 636, 637.
- Analizadores** : 681 y sigtes.
- Ancora** (Escape de - de los relojes y cronómetros), 116, 117.
- Anemómetros** : 1048.
- Aneroides** (Barómetros -) : 161.
- Angulo de conjunción** : 215.
- Angulo límite** : 512, 513.
- Angulo visual** : 557.
- Anillo de Newton** : 669.
- Anillo ocular** : 586, 589.
- Anión** : 728.
- Anisótropos** (Cuerpos -) : 677.
- Anodo** : 728.
- Anteojos** : 596.
- Anteojos astronómicos** : Marcha de los rayos en el -, 586; enfocamiento, 587; aumento, 588, 589; retículo, eje óptico, 590; campo explorador, 591; claridad, 592; aparatos meridianos y ecuatoriales, 593, 594.
- Anteojos de prismas** : 597.
- Anteojos de Galileo** : 596.
- Anteojos terrestres** : 595.
- Anticohesores** : 1027.
- Aparato de Mac-Leod** : 195.
- Aplanetismo** : - de los espejos, 502; - de las lentes, 551.
- Apreciación de la distancia** : 572.
- Arco eléctrico o voltaico** : 1002; lámparas de -, 1003 y sigtes.; reguladores de -, 1004.
- Arco iris** : 1069.
- Areómetros** : -, densímetros, 147; - Baumé, 148; - centesimales, 149; aplicación de la capilaridad a los -, 221.
- Ariete termohidráulico de Bunau-Varilla** : 388.
- Armaduras de los imanes y de los electroimanes** : 823, 828.
- Armaduras de un condensador** : 936.
- Armónica química** (aplicación a la cronofotografía) : 396.
- Armónicos** : Definición, 409; - de las cuerdas sonoras, 442, 443; - de los tubos sonoros, 445, 446; - investigación de los - en los sonidos compuestos, 450; influencia de los - en el timbre de los sonidos, 451, 452; - de las corrientes alternas, 858.
- Arquimedes** (Principio de -) : 136; recíproca del -, 137; aplicación del - a la medida del volumen y de la densidad de un sólido, 138, 146; aplicación del - a la medida de la densidad de un líquido, 146; aplicación del - a los gases -, 180 y sigtes.
- Arsonvalización** : 1046.
- Ascensional** (Fuerza - de los aerostatos) : 184.
- Ascensores hidráulicos** : 130.
- Astáticas** (Agujas imantadas -) : 808.
- Astigmatismo** : - de las lentes, 551; - del ojo humano, 563.
- Astros** : Constitución de los -, 634, 636; aplicación del análisis espectral al estudio del movimiento de los -, 637.
- Atérmanos** (Cuerpos -) : 606.
- Atmósfera** (Altura de la -) : 163.
- Atmósfera** (unidad de presión) : 156; - C.G.S., 156.
- Atomos** : 3; constitución de los -, 965.
- Atracciones eléctricas** : 723; leyes de las -, 884; explicación de las -, 898.
- Atracción universal** : Definición, 87; comparación de la gravedad y de la -, 88; estudio experimental de la -, 89.
- Atwood** (Máquina de -) : 72, 74, 76, 79.
- Audición** : 454, 455.
- Auer** (mechero de incandescencia por gas) : 621.
- Aumento** : - de una lente, 575, 576; - de un microscopio, 581; - de un anteojo astronómico, 588; 589; de un anteojo de Galileo, 596; - de un telescopio, 598.
- Auroras boreales o polares** : 1068.
- Autoclaves** : 294.

Automóviles : Motores de -, 355 y sigtes. eléctricos, 1015.

Aviación : 186.

Avogadro y Ampère (hipótesis de -) : 317.

Azoe (Véase Nitrógeno).

Azul del cielo : 163, 676.

B

Balancin de resorte en espiral : 117.

Balanzas : Descripción, 46; teoría de la -, 47; exactitud de las -, 48; sensibilidad de las -, 50, 51; - de precisión, 52; amortiguamiento de las -, 53; - de Roberval, 54; - romana, 55; - areométricas de Mohr, 146.

Barómetro : Teoría del - do mercurio, 154; - de líquidos distintos del mercurio, 155; - de cubeta y de sifón, 157; construcción de un -, 158; diversas formas do -, 159; de Fortin, 160; - metálicos o aneroides, de Vidie y de Bourdon, 161; - registrador de Richard, 162; aplicación del - a la medida de las altitudes, 163; - altimétrico, 163; aplicación del - a la medida de la presión de un gas, 164; aplicación del - a la previsión del tiempo, 1082 y sigtes.

Bastidores fotográficos : - negativos, de ventanas, de cortinas, 643; - prensa, 654, - de mercurio, 660.

Batería : Asociación de las pilas en -, 769; asociación de los condensadores en -, 939.

Bemoles : 411.

Biela de manubrio : 347.

Binocular (Visión -) : 571.

Biprisma de Fresnel : 668.

Birrefringencia de los cristales : 677 y sigtes.

Bocas de calor : 385.

Bolómetro : 241.

Bomba calorimétrica : 269.

Bombas para gases : 188 y sigtes.

Bombas para líquidos : Definiciones, 204; bomba aspirante, bomba aspirante e elevatoria, 205, 206; bomba aspirante e impelente, 207, bombas de doble efecto, 208; - de incendios, 209; - rotatorias, - centrifugas, 210.

Bombas para producir el vacío : principio de las -, 188; - de mano, industriales, 189; - Carré, 190; - con juntas de aceite, de Guericke, 191; - de mercurio, 192; rotatorias, 193; trompa de agua, 194, trompa de mercurio, 195; - molecular de Gaede, 961.

Bombas de compresión : - de mano, bomba

de bicicleta, 198; trompas insufiante, 196; - industriales, 198.

Botella de Leyden : 940.

Brillo de un foco luminoso : 467.

Brisas : 1048.

Brújulas : - marina, 706; - de declinación, 707; - de inclinación, 709; - de inclinación de Brünnner, 710; - de tangentes, 815.

Brumas : 1055.

Bujia (unidad de intensidad luminosa) : 468; **Bujia-metro** (unidad de alumbrado) : 468.

Bujías de alumbrado de los motores de explosión : 356.

Buques (Equilibrio de los -) : 141, - submarinos, 142.

C

Caballo de vapor : 92.

Cables eléctricos subterráneos y submarinos : 872, 1017.

Caida de los cuerpos : Trayectoria de la -, desviación de la - por el movimiento terrestre, 68; leyes de la -, 69 y sigtes.; aceleración de la -, 70; en el aire, velocidad limite, 80, 81.

Caja de distribución del vapor : 347; - de Clapeyron, 349.

Cajas de resistencias : 781.

Cajones de aire comprimido : 203.

Calderas de vapor : Ensayo de las - con la prensa hidráulica, 130; - con hervideros, tubulares, - Serpollet, de generación instantánea, - locomotoras, 346.

Calefacción : 295; - por chimeneas, 382; - por estufas, 383; - por caloríferos, 384 y sigtes.; - por aire caliente, 385; - por agua caliente, 386; - por vapor, 387; - eléctrica, 1008.

Calmas (Regiones de las - ecuatoriales y tropicales) : 1048.

Calor (Estudio del -) : 228 y sigtes.; cantidad de -, su medida, 263 y sigtes.

Calor animal : 375.

Calor de combustión : 269.

Calor de fusión : Definición del -, 275; medida del -, 282; medida del calor del hielo, 283; cuadro de - página 925.

Calor de vaporización : 296; - del agua, 297; cuadro de - página 925.

Calor desprendido en las reacciones químicas : 269.

Calor desprendido o absorbido por las acciones mecánicas : 102, 360 y sigtes.

Calor desprendido por las corrientes eléctricas : 761 y sigtes., 999 y sigtes.

- Calor desprendido por las descargas eléctricas** : 959.
- Calor radiante** : 605 y sigtes.
- Calores específicos** : Definiciones de los -, 265; medida de los - de los sólidos y de los líquidos, 270; leyes relativas a los -, 271; - de los gases, definiciones, 272; medida de los - de los gases a presión constante, 273; relación entre los - de los gases, 274; cuadro de - de los sólidos, de los líquidos y de los gases, página 925.
- Caloría** : 263; equivalente mecánico de la - 362.
- Caloríferos** : 384; - de aire caliente, 385; - de agua caliente, 386; - de vapor, 387.
- Calorífugos** : 381.
- Calorimetría** : 263 y sigtes.
- Calorímetros** : - de agua, 266; de Berthelot, 267; - de hielo de Bunsen, 268.
- Cámara clara** : 581.
- Cámara oscura** : 459; - fotográfica, 643.
- Cambios de estado físico** : Véase *Fusión, Solidificación, Vaporización, Licuefacción, Sublimación.*
- Campana de buzo** : 203.
- Campo (de un instrumento de óptica)** : - de un espejo plano, 475; - de un microscopio, 583; de un antejo, 591.
- Campo de visión** : 557, 570.
- Campo eléctrico** : Definición, 904; líneas de fuerza de un -, 905; - en las inmediaciones de un conductor electrizado, 906, 907; trabajo de las fuerzas eléctricas en un -, 909; diferencia de potenciales entre dos puntos de un -, 914; superficies equipotenciales en un -, 916, 917; cálculo del potencial en un punto de un -, 918; medida del potencial en un punto de un -, 949; - de la atmósfera, 1060.
- Campo magnético** : - de los imanes, 696 y sigtes.; - terrestre, 701 y sigtes.; de las corrientes, 787 y sigtes.; - de un carrete o de un solenoide, 791, 795.
- Campo magnético giratorio** : 868.
- Capacidad calorífica** : 205.
- Capacidad eléctrica** : Definición de la - de un conductor, 927; unidades de -, 928, 933, 935; - de una esfera, 930, 934; - de un condensador, 937, 941; medida de la - de un condensador y de un conductor cualesquiera, 952.
- Capilaridad** : Fenómenos capilares, 213; tubos capilares, 214, 215, 219; causa de la capilaridad, 216; fórmula de Laplace, 218; aplicación de la capilaridad a la corrección barométrica y a los areómetros, 220, 221; electro -, 948.
- Cápsula manométrica de Kœnig** : 447.
- Carburadores** : 356.
- Cárcel (unidad de intensidad luminosa)** : 468.
- Cardan (Suspension de -)** : 706.
- Carga eléctrica** : 721 y sigtes.; 884, 885; comparación de las - por el cilindro de Faraday, 886; - superficial de los conductores, 888 y sigtes.; - de los conductores por influencia, 893 y sigtes.; - de los condensadores, 936 y sigtes.; medida de la - de un condensador y de un conductor cualquiera, 953.
- Carnot (Ciclo de -)** : 369.
- Carnot (Principio de -)** : 369, 370.
- Carretes (Campos magnéticos de los -)** : 791, 795.
- Carretes de inducción o carretes de Ruhmkorff** : Principio y funcionamiento de los -, 875 y sigtes.; interruptores de los -, 875, 878 y sigtes.; aislamiento de los -, 882; aplicaciones de los -, 883.
- Carretes de self** : 862.
- Cartabón de corredera** : 14.
- Catetómetro** : 20.
- Catión** : 728.
- Cátodo** : 728.
- Catódicos (Rayos -)** : 962, 963.
- Cáusticos** : 501.
- C. G. S. (Sistema de medidas -)** : 10.
- Celostato** : 482.
- Centígrada (Escala - de los termómetros)** : 231.
- Centímetro** : 8.
- Centrífuga (Fuerza -)** : Definición y aplicaciones de la -, 83; regulador de -, 83, 351; efectos de la - sobre la gravedad, 112.
- Centripeta (Fuerza -)** : 82.
- Centro de las fuerzas paralelas** : 32.
- Centro óptico de las lentes** : 527, 541.
- Centro de gravedad** : Definición, 42; determinación empírica del -, 45.
- Centro de empuje** : 136.
- Centro de presión** : 127.
- Cero de la escala termométrica** : 251.
- Cero absoluto** : 236.
- Ciclos de los motores térmicos** : 357, 388.
- Ciclo de Carnot** : 369.
- Ciervos voladores** : 187.
- Cinemática** : 59 y sigtes.
- Cinematógrafos** : 397; cinematografía en colores, 661.
- Cinética (Energía -)** : 97 y sigtes.
- Cinética (Teoría - de los gases)** : 3.

- Circuito elétrico** : 715.
Circuito magnético : 826.
Circulo ocular : 586, 589.
Circulo parhiélico : 1071.
Cirros : 1052.
Claridad : Sentidos de -, 566; - en los anteojos, 592.
Clément y Desormes (Experimento de -) : 274.
Climas : 1076.
Climatología : 1072 y sigtes.
Clisés fotográficos : 651.
Codreado electrolítico : 996.
Coefficientes : - de elasticidad. 28; de ruptura, 28; - de compresibilidad de los líquidos, 225.
Coefficientes de dilatación : - lineal, 244; - cúbica, 245; - medios, 246; - de los cristales, 247; - del mercurio, 250; - de un líquido cualquiera, 252; - de los gases, 256, 259; cuadro de - de los sólidos y de los líquidos, página 924.
Coefficiente de permeabilidad magnética : 826.
Coefficiente de solubilidad : - de un gas en un líquido, 179; - de un sólido en un líquido, 332.
Coercitivo (Campo -) : 825.
Cohesión : Definición, 1; - de los sólidos y de los líquidos, 217.
Cohesión dieléctrica : 961.
Cohesores : 1027.
Coincidencias (Método de las -) : 105.
Colectores de dínamos y de magnetos : 850, 856.
Colimador : 616.
Colores : Visión de los -, 567; - de las radiaciones, 641; - de los cuerpos, 642; - complementarios, 642; fotografía de los -, 660, 661.
Coma : 410.
Combustión (Calor de -) : 269.
Comparadores : 21.
Comparador de niveles : 134.
Compás de tornillo, de Palmer : 17.
Compás de mar : 706.
Compensación de los péndulos y balancines de resorte en espiral : 248.
Componentes de una fuerza : 30.
Composición de las fuerzas : 30; - concurrentes, 31; - fuerzas paralelas, 32.
Composición de los movimientos : 84.
Compound : Máquinas de vapor -, 350; dínamos -, 852.
Compresibilidad : - de los sólidos, 28; - de los gases, 1, 171 y sigtes.; - de los líquidos, 225 y sigtes; - y dilatación de los gases, 255 y sigtes., 380 y sigtes.
Compresión de los gases : 1; - en la industria, 199; elevación de temperatura producida por la -, 309, 368.
Compresores : 198.
Concameraciones : 432.
Cóncavos (Espejos -) : 484 y sigtes.
Concentración de una solución : 332.
Condensación de la electricidad : 936 y sigtes. (Véase *Condensadores.*)
Condensación de los vapores : 306.
Condensador de luz : 574.
Condensador (de las máquinas de vapor) : 348.
Condensadores eléctricos : Aplicación de los - a la conducción de corrientes alternas, 863; aplicación de los - al carrito de Ruhmkorff, 875; definiciones de las armaduras de los - planos, - cerrados, 936; definiciones de la capacidad de un -, 957; efecto de las dieléctricas en la capacidad de los -, 938; construcción de los -, asociación en batería, 939; botellas de Leyden, jarras eléctricas, 940; cálculo de la capacidad de un -, 941; carga de los -, 942; descarga de los -, 943; descargas residuos de los -, 944; medida de la capacidad de un -, 952; medida de la carga de un -, 953.
Conductores industriales : 766.
Conductancia : 765.
Conductibilidad calorífica : Propagación del calor por conductibilidad, - de los sólidos, 376; leyes de la -, teoría de Fourier, coeficiente de - 377; estudio experimental de la - de los sólidos, 378; - de los líquidos, 379; - de los gases, 380; aplicaciones de la conductibilidad y de la mala - de los cuerpos, 381.
Conductibilidad eléctrica : 717, 763 y sigtes.
Conductividad : 765.
Conductores industriales : 766.
Congelación de las soluciones (Descenso del punto de -) : 336.
Conjunción de los sólidos y líquidos (Ángulo de -) : 215.
Conmutadores : 718.
Conmutatrices : 873.
Conservación de la electricidad (Principio de la -) : 887.
Consonancias : 408.
Consonantes : 452.
Constante capilar : Definición, 216; medida de la -, 222.

Constante de los gases perfectos : 316, 317.
Constante solar : 1072.
Continuidad del estado líquido y del estado gaseoso : 325.
Contraste de los colores : 569.
Convección del calor : 379.
Convección eléctrica : 963.
Convergencia : - de una lente, 534, 542; - de un sistema de lentes, 547.
Convexos (espejos esféricos) : 497 y sigtes.
Corona solar : 634.
Coronas : 676, 1071.
Corpúsculos catódicos : 963.
Correcciones : - barométricas, 159, 251; - de las pesadas efectuadas al aire, 181; - de las medidas de longitud, 248; - calorimétricas, 266.
Corredera de Stephenson : 351.
Correo neumático : 202.
Corriente eléctrica : Estudio de la -, 714 y sigtes.; producción de la - por las pilas, 714, 751 y sigtes.; intensidad de una -, definición, 716, 731, 793, 847; acciones químicas de una -, 728 y sigtes.; producción de la - por acumuladores, 745 y sigtes.; producción de la - por fenómenos termoelectrónicos, 756 y sigtes.; acciones caloríficas de una -, 761 y sigtes.; 1008; - derivadas, 780 y sigtes.; acciones electromagnéticas de las -, 787 y sigtes.; medida de la intensidad de una -, 808 y sigtes.; imantación por las -, 822 y sigtes.; producción de las - por fenómenos de inducción, 832 y sigtes.; producción de las - por las dinamos y magnetos de corrientes continuas, 850 y sigtes.; empleo de la - para accionar los motores, 854, 870, 1011 y sigtes.; transporte de la energía por las corrientes, 854, 870, 872; producción de la - por las dinamos y magnetos de corriente alterna, 855, 856; - polifásicas, bifásicas y trifásicas, 866; acciones fisiológicas de las -, 1043; - de alta frecuencia, 985, 1046; aplicaciones de la - a la electroquímica, 991 y sigtes.; alumbrado y calefacción por la -, 999 y sigtes.
Corrientes marinas : 1078.
Cortacircuitos : 761, 768, 774, 827.
Coulomb (Ley de -) relativa a las fuerzas magnéticas; 693; - a las fuerzas eléctricas, 844.
Covolumen : 318.
Crioscopia : 336.
Cristales (Véase *Cristalización*) : dilatación de los -, 247; birrefringencia de los -, 677; - positivos y negativos 678.

Cristalización : - por fusión, 278; - por presión, 280; por disolución, 333.
Criticas (Cuadro de las constantes), página 928.
Critico (Punto -) : 307, 323.
Gromoesfera solar : 634.
Cronógrafo registrador : 117, 390.
Cronómetros : 117.
Cronófono : 405.
Cronofotografía : 396; - por las llamas vibrantes, experimentos de Benoist, 396.
Crookes (Tubos de -) : 962.
Cuádruplex : 1023.
Cuarzo : Poder rotativo del -, 687; - piezoeléctrico, 976.
Cuentagotas : 219.
Cuerdas sonoras : Definiciones, 440; leyes de las vibraciones transversales de las -, 441; armónicos de las -, 442; fórmulas de las -, 443.
Cuerpos negros : 613, 619, 620.
Culombio (unidad práctica de cantidad de electricidad) : 716; definición electroquímica, 732; definición electromagnética, 847.
Cúmulos : 1052.
Curvas (*gráficos o diagramas*) : - de la caída de un cuerpo, 71; - de compresibilidad de los gases, 316, 318, 323, 327; - de dilatación lineal, 244; - de dilatación del agua, 253; - de fusión, 280; - de vaporización del agua, 287; - de la densidad de un líquido y de su vapor saturado, 324; - de sublimación, 328; - de solubilidad, 332; de imantación, 824, 825.

CH

Chimeneas : 382.
Chispa eléctrica : 900, 960 y sigtes.
Chispas de ruptura : 844.

D

Daltomismo : 567.
Declinación magnética : Definición de la -, 703; medida de la -, brújulas de declinación, 707; variaciones de la -, 708.
Declinómetros : 707.
Deformaciones de los sólidos bajo la acción de las fuerzas : 28.
Degradación de la energía : 372.
Degradadores fotográficos : 655.
Densidad (Definiciones de la -) : 58.
Densidad de los gases : Definiciones y fórmulas, 260; determinación de la -, 261-

262; cuadro de las densidades de los gases, página 928.

Densidad de un líquido : Definición, 58; determinación de la -, 143, 145, 146, 147; cuadro de las densidades de los líquidos, página 924.

Densidad de un sólido : Definición, 58; determinación de la -, 143, 144, 146; cuadro de las densidades de los sólidos, página 924.

Densidad de un vapor : Definición, 299; determinación de la -, 300 y sigtes.; - saturado, 303; - y de un líquido, 324.

Densidad eléctrica : 890.

Densímetros : 117.

Depresiones barométricas : 1083; repartición de los meteoros en las -, 1084; trayectorias ordinarias de las -, 1085; determinación de las -, 1086.

Depresiones capilares : 213, 215, 219.

Derivación : - de las corrientes eléctricas, 780 y sigtes.; excitación de las dinamos en -, 852.

Derramamiento de los líquidos : 223.

Descarga eléctrica : - de un conductor electrizado, 900; - de un condensador, 943; energía de las -, 957 y sigtes.; efectos de las descargas sobre los conductores y los aisladores, 959; efectos químicos de las descargas, 959; efectos fisiológicos de las -, 1044; - en los gases, chispa eléctrica, 960, - en los gases enrarecidos, 961 y sigtes.; oscilante, 985 y sigtes.

Descomposición de las fuerzas : 30.

Descomposición de la luz : 600 y sigtes.

Deslizamiento (Frotamiento de -) : 94.

Despolarización de las pilas : 751 y sigtes.

Destilación : 306.

Desviación de los rayos luminosos : - por refracción a través de una superficie plana, 507; - por refracción a través un prisma, 517 y sigtes.

Desviación de la plomada : - por las montañas, 89; - por el movimiento de la Tierra, 112.

Detectores de ondas electromagnéticas : 1027, 1031.

Dextrogiras (Sustancias -) : 687, 688.

Diáfanos (Cuerpos -) : 456.

Diáfragmas : - de las lentes, 551; - de los microscopios, 583; - de los aparatos fotográficos, 644.

Diagramas (Véase *Curvas*); - de los motores térmicos, 357, 358.

Diamagnetismo : 829.

Diámetro aparente : 557.

Diapasón : 389; - normal, 414.

Diatérmanos (Cuerpos -) : 606.

Dicromasia : 567.

Dieléctricos : Definición de los -, polarización de los -, 903; poder inductor de los -, 938; cargas residuos de los -, 943.

Difaseadas (Corrientes -) : 865 y sigtes.

Difracción de la luz : Fenómenos de -, 672; causa de los fenómenos de -, 673; - por los sistemas ópticos, 674; - por las redes, 675.

Difusión de los gases : Mezcla o -, 177; - a través de las paredes porosas y los orificios pequeños, ley de Graham, 178.

Difusión de los líquidos : 131; ósmosis, presión osmótica, 339.

Difusión de las radiaciones : 470, 628.

Dilatación : Fenómenos generales de la -, 229; - lineal, coeficiente de - lineal, 244; - cúbica, coeficiente de - cúbica, 245; fórmulas de la -, 246; - de los cristales, 247; aplicaciones de la - lineal a la compensación de los péndulos y de los balancines de resorte espiral, 248; efectos mecánicos de -, 249; - del mercurio, 250; aplicación de la - del mercurio a la corrección barométrica, 251; - de un líquido cualquiera, 252; - del agua, 253, 254; - de los gases, 255; leyes referentes a la - de los gases, 256 y sigtes.; estudio experimental de la - de los gases, 259; cuadros de los coeficientes de - de los sólidos y de los líquidos, página 924.

Dilatación de los gases (Frio producido por la -) : 309, 310, 368.

Dilatación del vapor en las máquinas de vapor. 349, 350.

Dilatómetro : - de Fizeau, 247; - de vástago, 252.

Dinámetro de Ramsden : 589.

Dinámica : 67 y sigtes.

Dinamómetros : 26.

Dinamos (Máquinas dinamo-eléctricas) : Principio de las dinamos de corriente continua, 850, 851; - diversas, - de corriente continua, excitación de las - en serie, en derivación, - compound, 852; - multipolares de corriente continua, 853; - de corrientes alternas simples, 855; - de corrientes alternas de varias fases, 866.

Dina o dinamia : 78.

Dioptria : 534.

Dióptricos (Sistemas -) centrales : 550.

Diplex : 1023.

Diplopia : 571.

Dirección de los globos : 185.

Dirigibles (Globos -) : 185.

Disco de Newton : 641.

Disco ocular : 586.

Disolución : - de los gases en los líquidos, 179; - de los sólidos en los líquidos, 332 y sigtes.

Disolventes : 332.

Dispersión de la luz : - solar, 610; explicación de la -, 601; aberraciones cromáticas de las lentes, acromatismo, 613; estudio de la dispersión por medio de los espectroscopios, 616 y sigtes.; aplicación de la dispersión al análisis espectral, 623, 624 y sigtes.; 630, 633 y sigtes.

Distorsión : - en las lentes, 551; - en los objetivos fotográficos, 644.

Distribución del agua en las poblaciones : 135.

Distribución de las aguas en la superficie del globo, 1080.

Distribución de la electricidad en un conducto, 888 y sigtes.

Distribución de la corriente eléctrica : - en derivación, 780; - en serie, 781.

Divisibilidad de la materia : 2.

Doble refracción : 677 y sigtes.

Dobletes : 577.

Dominante (Nota -) : 411.

Doppler (Principio de -) : 637.

Dorado electrolítico : 994.

Draga eléctrica Bunau Varilla : 1011.

Duplex : 1023.

E

Ebullición : 291 y sigtes.; cuadro de las temperaturas de -, página 925.

Ebullioscopia : 338.

Ecos : 424.

Ecuador magnético : 711.

Ecuatoriales (instrumentos) : 593; ecuatorial acodillado, 594.

Efecto Peltier, efecto Thomson : 760.

Efluvios eléctricos : 959, 961.

Eje óptico de una lente : 590.

Eje principal : - en los espejos esféricos, 483; - en las lentes, 526.

Ejes secundarios : - de los espejos esféricos, 483; - en las lentes, 527, 541.

Elasticidad : Definición de la -, 1; - de tracción, - flexión, - de torsión, coeficiente de -, 28; - de los gases, 171 y sigtes.; - de los líquidos, 225 y sigtes.

Electricidad : Estudio de la -, 714 y sigtes, 884 y sigtes.; cantidad de - 715, 732, 847, 884, 885; medida de una cantidad de -, 811, 839, 953.

Electricidad atmosférica : 1059 y sigtes.

Electrización : - por frotamiento, 721, 722; - por las pilas, 725; - por influencia, 893 y sigtes.; - superficial de los conductores, 888 y sigtes.

Electroimanes : 823.

Electrocapilaridad : 948.

Electrocoagulación : 1046.

Electrocución : 1043.

Electrodinámica : 802 y sigtes.

Electrodinómetros : 816.

Electrodos : 728.

Electroestática : Definición de la -, 726; estudio de la -, 844 y sigtes.

Electróforo : 920.

Electrólisis : Caracteres generales de la -, 728; - de las sales, 729; leyes cuantitativas de la -, 730 y sigtes.; aplicación de la - a la medida de la intensidad de una corriente, 734; teoría de la - 735; energía necesaria a la -, 736, 742; - por las corrientes alternas, 864; aplicaciones de la - a la galvanoplastia, al plateado, dorado, bronceado, niquelado, a la electrotipia, a la electroquímica, 991 y sigtes.

Electrólitos : 728; conductibilidad de los - fundidos, 765.

Electromagnetismo : 787 y sigtes.

Electrometalurgia : 997, 1008.

Electrómetros : Definición, - de panes de oro, 945; - de cuadrantes, 946; - de Branly, 947; - capilar, 948; - absolutos, 950.

Electromotriz (Fuerza -) : definición de la -, 737; unidades de -, 737, 847; cálculo de la - de una pila, 740; - de polarización, 743; - de filtración, 779; comparación de las -, 786; medida de las - por medio de voltímetros, 818, 951; - de inducción, 832, 837; medida absoluta de las -, 849; - de una dinamo, 851; dimensiones de una -, 1097.

Electrones : 965.

Electroquímica : 997, 998.

Electroscopio : 724; usos del -, 899.

Electrosiderurgia : 1008.

Electrostática : Definición de la -, 726; estudio de la -, 884 y sigtes.

Electrotipia : 992.

Elongación : 107, 392.

Emanación del radio : 980.

Embocaduras de los tubos sonoros : 444.

Emisión de las radiaciones : - por incandescencia, 618 y sigtes.; - por luminiscencia, 622, 623, 638; - por los gases y vapores, 623, y sigtes.; - por fosforescencia, 639; - por fluorescencia, 640.

Emisión (Teoría de la -) : 664.

Emisivo (Poder -) : 618.

Empuje ejercido por un líquido, centro de -. 136; - ejercido por un gas, 180 y sigtes.

Energía : - cinética o actual, 97 y sigtes.; - potencial, 100, 101; - vibratoria, 393; - calorífica, 102, 366 y sigtes.; - interna, 366 y sigtes.; terrestre, 373; - solar, 374; - eléctrica (véase *Energía eléctrica*).

Energía eléctrica : - de una corriente, 736, 761 y sigtes., 774; - de una pila, 737 y sigtes.; - en los fenómenos de inducción, 836 y sigtes.; - de una dinamo, 851; - de una corriente alterna, 861 y sigtes.; - de un conductor electrizado y de un condensador, 955 y sigtes.

Energía (Principio de la conservación de la -) : 102.

Energía (Transporte de la -) : - por las corrientes continuas, 854, 1011, y sigtes.; - por las corrientes alternas, 870, 872, 1011 y sigtes.

Equilibrio : - de las fuerzas, 24; - de las fuerzas en las máquinas simples, 33 y sigtes; - de los sólidos graves, - estable, - inestable, - indiferente, 43 y sigtes.; de los líquidos pesados, 119 y sigtes; - de los cuerpos sumergidos y de los cuerpos flotantes. 139 y sigtes.; - de los gases, 150 y sigtes.; - de los cuerpos sumergidos en la atmósfera, - de los aerostatos, 180 y sigtes.; - de un cuerpo puro bajo uno, dos y tres estados, 314 y sigtes.; - eléctrico, 726, 884 y sigtes.

Equipotenciales (Superficies -) : 916.

Equivalencia del calor y del trabajo : 102, 360 y sigtes.; principio de la -, 361.

Equivalencia de electricidades contrarias desarrolladas simultáneamente : 887.

Equivalente mecánico de la caloria (o del calor) : Definición del -, 362; determinación del -, 363, 364, 365.

Equivalentes electroquímicos : 733.

Ergamia o ergo : 91.

Errores (en las medidas) : - absolutos, - relativos, 11.

Escala musical : 410.

Escala termométrica : - centígrada, 231, - 236; Reaumur y Fahrenheit, 233.

Escafandra : 203.

Escape de los relojes y cronómetros : 116, 117.

Escarcha : 1056.

Eserómetro : 16.

Espectral (Análisis -) : Véase *Análisis espectral*.

Espectros : - solar, 610, 633; - continuos

de los sólidos y de los líquidos incandescentes, 618 y sigtes.; - de los vapores y de los gases, 623 y sigtes.; rayas y bandas de los - de emisión, 623 y sigtes.; - de absorción, 630; - de los astros, 636; - de las redes, 675.

Espectros (o fantasmas) eléctricos : 905.

Espectros (o fantasmas) magnéticos : - de los imanes, 698, 699; - de las corrientes rectilíneas circulares; - de los solenoides, 789 y sigtes.

Espectrofotómetros : 466.

Espectrógrafos : 616.

Espectroscopios : - ordinarios, 615; - de Gramont, 615; - de visión directa de Amici, de Hoffmann y de Thollon, - de escalones, 616; - de redes, 616, 675.

Espejismo : 516.

Espejos : - definición, 470; - planos, 472 y sigtes.; - esféricos, 483 y sigtes.; aberraciones de los - esféricos, 501; - aplánéticos, elípticos y parabólicos, 502.

Espejos planos : formación de las imágenes por los -, 472; imagen de un objeto, 474; campo, 475; - inclinados, imágenes múltiples. 476; - paralelos, 477; - azogados, 478; espejo giratorio, 479 y sigtes.

Espejos esféricos cóncavos : Definición, 484; foco principal de un -, 485; focos secundarios, plano focal, 486; imagen de un punto y de un objeto, imágenes reales y virtuales, 487 y sigtes.; determinación de la distancia focal, 491; teoría de los -. fórmulas de los -, 492 y sigtes.

Espejos esféricos convexos : Estudio geométrico y experimental, 497; fórmulas de los -, 498; medida de la distancia focal, 499.

Espejos de Fresnel : 668.

Espintariscopio : 978.

Espiral (Balacín de resorte -) : 117.

Estado higrométrico : 340 y sigtes.

Estados correspondientes (Ley de los-) : 327.

Estados físicos de los cuerpos (estado sólido, estado líquido, estado gaseoso) : 1.

Estática : - de los sólidos, 24 y sig.; - de los gases, 150 y sig.

Estereoscopia y Estereoscopios : 658.

Estetoscopio : 422.

Estrabismo : 571.

Estratos : 1052.

Estroboscopia : 398.

Estufas : 383.

Éter : 664.

Eutéticas (Mezclas -) : 334.
Eutexia (Punto de -) : 334.
Evaporación : 290; factor de -, 290; frío producido por la -, 298.
Exactitud de una balanza : 48.
Excéntrica : 347.
Excitador : 943; - de Hertz, 987.
Excitación de las dinamos : 852.
Expansibilidad de los gases, 1, 153.
Explorador de una lente : 591.
Exradio : 98.

F

Fantasmas eléctricos : Véase *Espectros eléctricos*.
Fantasmas magnéticos : Véase *Espectros magnéticos*.
Faraday : ley de - referente a la electrolisis, 733; cilindro de -, 886; teorema de - sobre la influencia eléctrica, 896.
Faradio : 928, 950.
Faradisación : 1045.
Faros : 553.
Fase de un movimiento vibratorio : 392.
Fases (Ley de las -) : 331.
Fenaquiscopio : 397.
Fenómenos : 4.
Ferrocarriles eléctricos : 1014.
Fijación de las imágenes fotográficas : 650, 654.
Física (Objeto de la -) : 4.
Flexión : 28.
Flotantes (Cuerpos -) : Equilibrio de los -, 139 y sigtes.; aplicaciones de las condiciones de equilibrio de los - a los areómetros, 147 y sigtes.
Flúidos : 1.
Flúidos (Resistencia de los - al movimiento) : 80.
Flujo de luz : 462.
Flujo magnético : Definición del - 805; flujo de inducción, 806; medida del - y del flujo de inducción, 842.
Fluorescencia : 640.
Focal (Distancia) : - de un espejo cóncavo, 485, 491; - de un espejo convexo, 497, 499; - de una lente convergente, 528, 533; - de una lente divergente, 542, 548; - de un sistema de lentes delgadas, 547.
Focal (Plano) : - de un espejo esférico cóncavo, 486; - de un espejo esférico convexo, 497; - de una lente convergente, 528; - de una lente divergente, 542.

Focales (Rectas) : 514.
Focómetro : 533.
Focos : - en los espejos cóncavos, 485, 486; - en los espejos convexos 497; - en las lentes convergentes, 528; - en las lentes divergentes, 542.
Fonógrafos : 404.
Fortin (Barómetro de -) : 160.
Fosforescencia : 639.
Fosforoscopia : 639.
Fotocología : 657.
Fotogliptia : 657.
Fotograbado : 657.
Fotografía : Definición, cámara oscura, bastidores fotográficos, 643; objetivos y diafragmas, 644; exposición, 615; - instantánea, obturadores, 646; - con luz artificial, 647; placas al gelatino-bromuro de plata, 648; revelación y operaciones subsiguientes, 649 y sigtes.; retoques, 652; placas peliculares y películas 653; tirada de las pruebas, 654; procedimientos con sales de platino, sales de hierro, con carbón, positivas on cristal; ampliaciones, degradaciones, 655; - micrográfica, 656; procedimientos mecánicos, 657; - estereoscópica, 658; - integral, 658; ortocromática, 659; - de los colores, método directo, 660, 671; - de los colores, método indirecto o procedimiento tricromo, 661.
Fotolitografía : 657.
Fotólisis : 662.
Fotometría : Definiciones, 461; leyes de la iluminación, 462; comparación de las intensidades luminosas, 463 y sigtes. (véase *Fotómetros*); brillo intrínseco, 467; tipos de luz, 468; estudio de diversos focos, 469.
Fotómetros : - de Foucault, 462; - de Rumford, 464; - de Bunsen, 465; - perfeccionados, - de Cornu, espectrofotómetros, - de chispas, 466.
Fotomicrografía : 656.
Fotosfera solar : 634.
Fototerapia : 963.
Foucault (Péndulo de -) : 115.
Fracción de saturación : 340.
Franjas de interferencias : 668 y sigtes.
Franklinización : 1045.
Frascos de densidad : 144, 145.
Frauhofen (Rayas de -) : 633.
Frecuencia : - de un movimiento vibratorio, 392; - de las vibraciones luminosas, 666; - de una corriente alterna, 855.
Freno de aire comprimido (freno Westinghouse) : 202.

Freno de Prony : 359.
Frigoríficas (Máquinas -) : 313.
Frio : - debido a la evaporación, 298; - debido a la expansión de los gases, 309, 310, 368; producción industrial del frío, 313.
Frotamiento : - de deslizamiento, \pm de arrastre, 94; producción de calor por -, 102, 360, 363; - interior de los líquidos y de los gases, 217; producción de la electricidad por -, 721, 722, 887, 925.
Fuelles : 406.
Fuerzas : Definiciones de las -, efectos de las -, representación de las -, medida de las -, 23 y sigtes.; unidades de fuerzas, 26, 78; composición y descomposición de las - 30 y sigtes.; - concurrentes, paralelogramo de las -, 31; - paralelas, centro de las - paralelas, pares, 32; equilibrio de las - en las máquinas simples, 33 y sigtes.; proporcionalidad entre las y las aceleraciones, 76; fuerzas moleculares, 217; dimensiones de una fuerza, 1094.
Fuerza ascensional de los aeróstatos : 184.
Fuerza centrífuga : 83; regulador de -, 83, 351; efecto de la - sobre la gravedad, 112.
Fuerza centripeta : 82.
Fuerza coercitiva o campo coercitivo : 825.
Fuerza elástica de un gas : 153.
Fuerza electromotriz (Véase *Electromotriz*).
Fuerza electromotriz de filtración : 779.
Fuerza expansiva del hielo : 279.
Fuerza magnetomotriz : 826.
Fuerzas vivas (Teorema de las -) : 96.
Fulguritas : 1064.
Fusión : Leyes de la -, 275; calor de - : 275, 282, 285; cambios de volumen durante la -, 279; influencia de la presión sobre el punto de -, 280; reversibilidad de la -, 329; cuadros de los puntos de - y de los calores -, página 925.

G

Galvanización : 1045.
Galvanómetros : - de imán móvil, 808; - de Thomson, 809; - diferenciales, 810; - balísticos, 811; shunt de los -, 812; contraste de los -, 813; - de corriente móvil, Deprez-d-Arsonval, 814; - absolutos, brújula de tangentes, 815; industriales, 817, 818,
Galvanoplastia : 991 y sigtes
Gamas : Definición 410; - naturales, 411; -

menores, 412; - temperada, 413; notación de las diversas - naturales, 415.
Gases : Definición, 1; pesadez de los -, 150; ostática de los -, 150 y sigtes.; presiones en los -, 151 y sigtes.; expansibilidad de los -, 1, 153; fuerza elástica de un -, 153; medida de la presión de un - 154 y sigtes.; 164 y sigtes.; compresibilidad de los^c -, 171 y sigtes.; 315 y sigtes.; mezcla o difusión de los gases, 177; difusión de los a través de las paredes porosas y de los pequeños orificios, 178; disolución de los - en los líquidos, 179; principio de Arquímedes aplicado a los -, 180 y sigtes.; bombas de -, 188 y sigtes.; termómetro de -, 236, 237; dilatación de los - 229, 255 y sigtes.; perfectos, - 257; ecuaciones características de los -, 257, 315 y sigtes.; densidad de los - 260 y sig.; calores específicos de los -, 272 y sigtes.; mezcla de los gases y de los vapores, 289; punto crítico de los -, 307, 363; licuefacción de los gases, 308 y sigtes.; transformaciones isothermas y adiabáticas de los -, 314 y sigtes.; conductibilidad calorífica de los -, 380; vibraciones de los - en los tubos sonoros, 444 y sigtes.; descargas eléctricas en los -, 960 y sigtes.
Gases comprimidos : Producción de los -, 108, 199, 200; recipientes de - reguladores de presión, 200, 201; aplicaciones de los -, 202, 203.
Gases liquidados : Producción de los -, 308 y sigtes.; conservación y transporte de los -, 311; aplicaciones de los -, máquinas frigoríficas, 313.
Gauss (unidad de intensidad del campo magnético) : 697.
Geissler (Tubos de -) : 961.
Gelatinobromuro (placas fotográficas) : 648.
Gemelos : 596, - de prismas, 597.
Generadores de vapor : 346 (Véase *Calderas*).
Generatrices (dínamos) : - de corrientes continuas, 850 y sigtes.; - de corrientes alternas simples, 855; - de corrientes de varias fases, 866.
Geodésicas (Medidas -) : 22.
Globos : 183 y sigtes. (Véase *Aeróstatos*).
Goniómetro : 524.
Gradiente barométrico : 1087.
Gotas (formación de las -) : 219.
Grado centígrado : 31, 236.
Gráfico (Método -). (Véase *Registro*).
Gráficos (Véase *Curvas*).
Graham (Ley de - sobre la difusión de los gases) : 178.

Gramme (Máquinas de -) : 850 y sigtes.
Gramo (unidad de masa) : 56.
Gramófono : 404.
Gramo-peso : 57.
Granizo : 1058.
Gravedad : Definición de la -, 38; dirección de la -, 39; intensidad de la -. (Véase *Intensidad de la Gravedad.*)
Gravitación universal : 86 y sigtes. (Véase *Atracción Universal*),
Gulf-Stream : 1078.

H

Haces luminosos : 457,
Halos : 1070.
Hall (Fenómeno de -) : 765.
Hectovatio : 92.
Hectovatio-hora : 738.
Helicópteros : 187.
Helicromía (o fotografía de los colores) : 660 y sigtes.
Hidroaeroplanos o hidroplanos : 187.
Hidrodinámica : 119, 223, 224.
Hidroestática : Definición, 119; presiones en los líquidos en equilibrio, 120 y sigtes.; superficies libres de los líquidos, superficies de separación de los líquidos entre sí, vasos comunicantes, 131 y sigtes.; principio de Arquímedes y cuerpos flotantes, 136 y sigtes.
Hielo : Cristilización del -, 278; fuerza expansiva del -, 279; rehelo, 281; calor de fusión del -, 283; producción artificial del -, 313.
Hierro dulce (Imantación del -), 822 y sig.
Higrometría : Definición, 340; fórmulas relativas a la -, 345. (Véase *Higrómetros.*)
Higramétrico (Estado -) : Definición, 340; medida, 341 y sigtes.
Higrómetros : 340; - de condensación, - de Alluard, 341; - de cabello, 343; - registrador, 344.
Hipermetropía : 559.
Hipsometría : 293.
Histéresis magnética : 825.
Homogeneidad de las fórmulas : 1096.
Horizonte : 40.
Horizontal (Plano) : 40.
Horizontal : 40.
Hornos eléctricos : 1008.
Horse-power : 92.
Huygens (Construcción de -) : 506.

Iluminación : Definición de la -, 461; leyes de la -, 462; unidad práctica de -, 468.

Imágenes : - producidas por las pequeñas aberturas, 459; - en los espejos planos, 472 y sigtes.; virtuales y reales en los espejos planos, 473; - en los espejos esféricos, 486 y sigtes.; - por refracción a través de una superficie plana, 514; - por refracción a través de una lámina de caras paralelas, 515; - en el prisma, 523; - en las lentes, 529 y sigtes.; - del ojo, 556; - de Purkinje, 561; - en los instrumentos de óptica, 573 y sigtes.

Imán roto (Experimento del -) : 831.

Imanes : Definiciones, 690 y sigtes.; polos de los -, 691, 700; campos magnéticos de los 696 y sig.; líneas de fuerza de los -; campos magnéticos de los -; espectros magnéticos de los -, 698, 699; acción de un campo uniforme en los -, 700; de un campo magnético terrestre sobre los -, 701, 702; acción de las corrientes sobre los -, 787 y sigtes.; acción de los - sobre las corrientes, 796 y sigtes.; acción de los - sobre los solenoides, 801; fabricación de los -, 828; - Jamin, 828; constitución de los -, teorías del magnetismo, 831.

Imantación : - por influencia, 695; - del hierro dulce en un campo magnético, 822; - del hierro en un campo creciente, 824; - del hierro en un campo variable, 825; - del acero templado, 828; - de las substancias distintas del hierro y del acero, 829.

Impresiones luminosas (Persistencia de las -) : 568.

Incandescencia : 618 y sigtes.; alumbrado por -, 621, 999, y sigtes.

Incandescencia (Lámparas eléctricas de -) 999 y sig.

Inclinación magnética : Definición, 703; medida de la -, brújulas de inclinación, 709, 710; variaciones de la -, 711.

Indicador de Watt : 358.

Índice de refracción : Definición, 505; índice inverso, 508; índice absoluto, índice relativo, 510; medida de los -, 524, 525.

Inducción : Corrientes inducidas, definiciones y leyes, 832; fuerza electromotriz de -, 832, 837; - por el campo terrestre, 833; - por un imán, 834; - por una corriente, 835; - en circuito abierto, 838; ley de Neumann, 839; - por variación de flujo sin movimiento, 840; influencia del hierro en los fenómenos de inducción, 841; aplicación de la - a la medida del

flujo magnético, de la inducción, de la permeabilidad magnética y de la intensidad de un campo magnético, 842, 843; self -, 814; corrientes de Foucault, 815; aplicación de la - a la producción de corrientes continuas, 855 y sigtes.; aplicación de la - a la producción de corrientes alternas, 855 y sigtes., 866; aplicaciones de la - a la transformación de las corrientes, transformadores y carretes de -, 871 y sigtes.; - por oscilaciones eléctricas, 986 y sigtes.; aplicación de la - a la telefonía, 1035 y sigtes.

Inducción magnética : 806.

Inercia (Momento de -) : 96.

Inercia (Principio de la -) : 67, 74.

Influencia electrostática : Fenómeno fundamental de la -, 893; carga por -, 894; - en un conductor que envuelve al cuerpo influyente, 895; cantidad de electricidad desarrollada por la -, 896; - en un conductor ya cargado, 897; aplicaciones de la -, 898 y sigtes.; máquinas eléctricas de -, 920 y sigtes.

Infrarojos (rayos) : 602, 614, 988.

Instrumentos para medir longitudes, 12 y sigtes.

Instrumentos de óptica : 573 y sigtes.

Intensidad de la gravedad : Definición de la -, 57, 77; medida de la - por medio del péndulo, 111; causas de las variaciones de la - en la superficie de la tierra, 112; variaciones de la - en lo interior del globo, 113; medida de la - en el mar, 111.

Intensidad de los sonidos : Causa de la -, 401; disminución de la - durante la propagación al aire libre, límite de la intensidad de los sonidos perceptibles, 421; conservación de la - durante la propagación en un tubo y aplicaciones, 422.

Intensidad luminosa : Definiciones, 461; comparación de las -, 463 y sigtes.; tipos de -, 468.

Intensidad de una corriente eléctrica : Noción de la -, 715; definición electrolítica de la - 731; - unidades de intensidad de la corriente eléctrica; amperio, unidad electromagnética cegesimal, unidad electrostática cegesimal, 731, 793, 1098; medida electrolítica de la -, 734; definición electromagnética de la -, 793; medida de la - por los galvanómetros, los electrodinamómetros, y los amperímetros, 808, y sigtes.; dimensiones de la - en el sistema electromagnético y en el electroestático, 1907, 1908; definición electrostática de la -, 1098.

Interferencias : - de los movimientos vibratorios, principio de las -, 431 y sigtes.; - de las ondas sonoras, 433, 434, 443, 446; - luminosas, 665, 668 y sigtes.

Interruptores de corriente eléctrica, 718.

Interruptores de los carretes de inducción : - M. Deprez, - Carpentier, 878; - Foucault y sus derivados. - Villard, 879; - rotatorio Contremoullins, 880; - electrolítico de Wehnelt, - de orificios, 881.

Intervalos musicales : 407 y sigtes.

Invar (Aleación ó Metal -) : 22.

Inversión de las rayas de los espectros : 632.

Inversión termoelectrica : 758.

Inyector Giffard : 351.

Ionización : - de las soluciones, 336, 338, 339, 735; - de los gases, 973, 976.

Iones : Disociación en -, 336 y sigtes; 735; definición, - 728; transporte de los -, 735; - en los gases, 973, 976.

Irradiación : Definición, 600; estudio de la -, 601 y sigtes; leyes de la - por incandescencia, 618 y sigtes. (Véase *Radiaciones*).

Isóbaras (Líneas -) : 1083.

Isocronismo de las oscilaciones; - de un péndulo, 104; - de una lámina vibrante, 391.

Isógonas (Líneas -) : 708.

Isoquimenas (Líneas -) : 1075.

Isóteras (Líneas -) : 1075.

Isotermas (Transformaciones - de los gases) : 171 y sigtes; 314 y sigtes; - de los gases liquidables, 333.

Isotermas (Curvas - de los gases) : 173, 316, 318, 327; - liquidables, 323.

Isotermas (Líneas - en la superficie de la tierra) : 1075.

Isótropos (Cuerpos -) : 677.

J

Jarras eléctricas : 940.

Jaula de ardilla (Inducido de -) : 869.

Joule : Experimentos de - sobre la equivalencia mecánica de la caloría, 363; ley de - referente a los gases perfectos, 367; ley de - acerca del desarrollo de calor por las corrientes eléctricas, 762.

Julio (unidad de trabajo) : 91.

K

Kerr : Fenómeno de -, 944.

Kilocaloría : 263.

Kilogramo : 56.

Kilogramo-tipo : 56.

Kilogramo-peso : 26.

Kilogrametro : 91.
Kilovatio : 92.
Kilovatio-hora : 738.
Kinemacolor : 661.
Kinetoscopio : 397.
Kirchoff (Ley de - sobre la irradiación) : 632.

L

Láminas de caras paralelas : Propiedades ópticas de las -, 509; visión a través de las -, 515.

Láminas delgadas (Interferencias de la luz producidas por las -, coloración de las -), 669 y sigtes.

Láminas vibrantes : 389 y sigtes.

Lámparas eléctricas : - de incandescencia con filamento de carbón, 999; - de incandescencia con filamento metálico, 1000; - Nernst, 1001; - de arco, 1003; reguladores de las - de arco, 1004; - de arco en vaso cerrado, 1004; - de arco sin regulador, bujía Jablochhoff, mechero Jamin, 1005; - instalación completa de una lámpara de arco, 1006; - de vapor de mercurio de Cooper-Hewitt, luz de Moore, - de neon, 1007.

La normal : 414.

Laplace : Fórmula de - sobre la capilaridad, 218; fórmula de - sobre las acciones electro-magnéticas, 792, 796.

Larga vista : 595.

Lastre de los globos : 183.

Lentes : Definiciones, - convergents - divergents, 526, 527; propiedades y fórmulas de las - convergents, 528 y sigtes; propiedades y fórmulas de las - divergents, 541 y sigtes; asociaciones de las - delgadas, 547; - espesas, 549; defectos de las -, 551, 603; aplicaciones de las - convergents a los proyectores y faros, 552, 553; talla de las -, 554; aplicaciones de las - a la corrección de los defectos de la vista, 559, 560; aplicaciones de las - a los instrumentos de óptica, 573 y sigtes.

Lenz (Ley de -) : 835.

Levogiras (Sustancias -) : 687, 688.

Leyes físicas : 6.

Límite (Angulo -) : 512, 513.

Limpieza por el vacío : 502.

Líneas de fuerza eléctricas : 905, 906.

Líneas de fuerza magnéticas : - de los campos de los imanes, 698, 699; - de los campos de las corrientes y de los solenoides, 789 y sigtes; - en la máquina de Gramme, 850.

Líneas de transporte de energía : 854, 872.

Líneas telegráficas aéreas, subterráneas, submarinas, 1017.

Línea visual : 557.

Linternas de proyección : 574.

Licuefacción de los vapores y gases : - licuefacción o condensación de los vapores, 306; condiciones generales de la licuefacción de un gas, punto crítico, 307, 323; diversos procedimientos de licuefacción de los gases, uso de la dilatación, aparato de Cailletet, aparato Linde, 308 y sigtes.

Líquidos : Definición, 1; equilibrio de los -, 119 y sigtes (véase *Hidrostatica*); difusión de los -, ósmosis, 131, 339; densidad de los -, 143, 145 y sigtes; derramamiento de los -, 223, 224; compresibilidad de los -, 225 y sigtes; vaporización de los -, 284 y sigtes.; evaporación de los -, 290; ebullición de los -, 291 y sigtes.

Líquido glicérico : 216.

Locomotoras : 353.

Longitudes de ondas : Definición, 417; - sonoras, 417; - luminosas, 612, 665; determinación de las - luminosas, 671, 675.

Lux (unidad de alumbrado) : 468.

Luz : Definición, 456; propagación rectilínea de la -, 457 y sigtes.; velocidad de la -, 460; intensidad de la -, 451 y sigtes.; reflexión de la -, 470 y sigtes.; refracción de la -, 503 y sigtes.; dispersión de la -, 610 y sigtes.; interferencias de la -, 665 y sigtes.; difracción de la -, 672 y sigtes.; doble refracción de la -, 677 y sigtes.; polarización de la -, 681 y sigtes.; teoría electro-magnética de la -, 988.

Luz blanca : 641.

Luz eléctrica : 999 y sigtes. (Véase *Lámparas eléctricas*.)

Luz fría : 574.

LL

Llamas manométricas : 447; fotografía de las -, 452.

Lluvia : 1054.

M

Magnéticos (Cuerpos -) : 829.

Magnetismo : Estudio del -, 690 y sigtes.; teorías del -, 831.

Magnetismo terrestre : Campo magnético terrestre, 701; par terrestre, 702; declinación e inclinación, meridiano magnético, 703 y sigtes. (Véase *Declinación e Inclinación*.)

- Magnetos** (Máquinas magneto-eléctricas) :
 - de encendido de los motores de explosión, 356; - de corriente continua, máquina de Gramme, 850; - de corriente alterna, 856; empleo de las - en las llamadas telefónicas, 1011.
- Magnetómetro** : 713.
- Magnetomotriz** (Fuerza -) : 826.
- Magnitudes** : Definiciones de las -, 5; principio de la medida de las -, 7.
- Manantiales** : 135; - termales y - minerales, 1079.
- Maillechort** (Resistencia eléctrica del -) : 765.
- Manganina** (Resistencia eléctrica de la -) : 765.
- Manipuladores de los telégrafos** : - de Breguet, 1019; - de Morse, 1020.
- Manómetros** : - de aire libre, 164; - de Regnault, 165; - barométrico, 166; - de la Torre Eiffel, 167; - de Desgoffes, 168; - metálico de Bourdon, 169; - registrador, 170.
- Mapas magnéticos** : 708.
- Máquinas simples** : Palancas, 33; polea fija, 34; torno, 35; plano inclinado, 36; transformación del trabajo por las -, 93.
- Máquina de dividir** : 18.
- Máquina de Atwood** : 72, 74, 76, 79.
- Máquina de Morin** : 71.
- Máquinas neumáticas** (Véase *Bombas*).
- Máquinas de compresión** (Véase *Bombas de compresión*).
- Máquinas frigoríficas** : 298, 313.
- Máquinas térmicas** (Véase *Máquinas de vapor y Motores de Explosión*).
- Máquinas de vapor** : Principio, generadores de vapor, 346 (Véase *Calderas*); - propiamente dicha, 347; condensador, 348; expansión del vapor, 349; - expansión múltiple, - compound, 350; órganos accesorios de las -, bombas alimenticias, inyector Giffard, regulador de fuerza centrifuga, corredera de Stephenson, 351; horizontales, 352; locomotoras, 353; turbinas de vapor, 354.
- Máquinas eléctricas** : Definición, electróforo, 920; - de influencia, principio, replenisher, 921; caracteres distintivos de las -, 922; - de Wimshurst, 923; - de Holtz, 924; - de frotamiento, 925.
- Máquinas magneto y dinamo-eléctricas** - Máquina de Gramme (Véase *Magnetos y Dinamos*).
- Mares** (Temperatura de los) : 1078.
- Mariotte** (Ley de -) : 171, 172; estudio experimental de la -, 173 y sigtes.
- Mariotte Frasco o vaso de -** : 224.
- Marmita de Papin** : 294.
- Martillo** : 98.
- Martillo de agua** : 68.
- Masa** : Noción de -, 56; relación entre el peso y la -, 57, 77; definición dinámica de la -, 77.
- Masa eléctrica** : 88-1, 1098.
- Masa magnética** : 694.
- Masa específica** : Definición, 58; - del agua a 4º, 56; - del aire, 200, 262.
- Materia** (Diversos estados de la -) : 1.
- Máximo de densidad del agua y de las soluciones salinas**, 254.
- Mecheros de incandescencia** : 621.
- Medida de las fuerzas** : 26.
- Medida de la intensidad de la gravedad** (Véase *Intensidad de la Gravedad*).
- Medida de magnitudes** : Definiciones, 7; medidas absolutas ó racionales, sistema cegesimal, 10; errores en las -, errores absoluto y relativo, 11.
- Medida de longitudes** : Reglas graduadas, 12; nonio ó vernier, 13; cartabón de corredera, 14; tornillo micrométrico, 15; esferómetro, 16; máquina para dividir, 18; micrómetro ocular, 19; catetómetro, 20; comparadores, 21; medidas geodésicas, 22.
- Medida de las masas** : 56 (Véase *Balanza*).
- Medida de presiones** : Medida de la presión atmosférica, 154 y sigtes (Véase *Barómetro*); medida de la presión de un gas o de un vapor, 164 y sigtes (Véase *Manómetros*).
- Medida de las cantidades de calor** : 263 y sigtes (Véase *Calorímetros*).
- Medida de las temperaturas** : 230 y sigtes. (Véase *Termómetros*).
- Medidas acústicas** : Medida de la altura de un sonido, 406; medida de la velocidad de un sonido, 435 y sigtes. (Véase *Velocidad del sonido*).
- Medidas eléctricas** : Medida de la intensidad de una corriente (Véase *Intensidad de la corriente eléctrica*); medida de las fuerzas electromotrices (Véase *Electromotriz*); medida de resistencias (Véase *Resistencia eléctrica*); medida de diferencias de potenciales (Véase *Potencial eléctrico*); medida de capacidades eléctricas (Véase *Capacidad eléctrica*); medida de las cargas eléctricas (Véase *Carga eléctrica*).
- Medidas magnéticas** : Medida de la declinación y de la inclinación magnéticas, 707, 709, 710; medida del momento mag-

- nético de un imán y de la componente horizontal del campo terrestre, 713.
- Medidas ópticas** : Medida de la velocidad de la luz, 460; medida de la intensidad de los focos luminosos, 463 y sigtes. (Véase *Fotometría*); medida de las distancias focales de los espejos y de las lentes, 491, 499, 533, 518; medida de los índices de refracción, 524, 525; medida de la potencia y del aumento de un instrumento de óptica (Véase *Microscopio* y *Anteojo*); medida de las longitudes de onda luminosas, 671, 675.
- Megadina** : 78.
- Megargamia** : 91.
- Megascopios** : 574.
- Megohmio** : 765.
- Membranas semipermeables** : 339.
- Meridiano magnético** : 703.
- Meridiano geográfico y meridiano magnético** : 703.
- Meridiano (Anteojo -)** : 593.
- Metacentro** : 141.
- Metalografía** : 584.
- Meteoros** : 1017 y sigtes.
- Meteorología** : 1017 y sigtes.
- Metro** : Definición del -, - tipo, - normal internacional, 8.
- Mezcla de los gases** : 177.
- Mezcla de los gases y de los vapores** : 289.
- Mezclas frigoríficas** : 339.
- Microcinematografía** : 397.
- Micrófonos** : - de Hughes, 1037; - Adler, - de membrana, - Bailleux, - de limaduras, 1038.
- Micrografía** : 656.
- Microhmio** : 765.
- Micrómetro ocular** : 19.
- Micrón** : 2.
- Microscopio** : Marcha de los rayos en el -, 578; enfocamiento, visión profunda, 579; descripción de un -, 580; potencia y aumento de un -, 581; objetivos y oculares del -, 582; campo, diafragma, punto ocular, 583; aplicaciones del -, metalografía, 584; ultra -, 585.
- Microscopio simple** : 575 y sigtes.
- Minimum de desviación en el prisma** : 519, 520.
- Miopía** : 559.
- Moleculares (Fuerzas -)** : 217.
- Moléculas** : 3.
- Molinete eléctrico** : 892.
- Momento de inercia** : 96.
- Momento magnético** : - de un imán, definición, 700; - de un imán, medida, 713; - de una corriente plana, 799; - de un carrito, 816.
- Mongolfieras** : 183.
- Monófono** : 1039.
- Monzones** : 1018.
- Morin (Máquina de -)** : 71.
- Motores** : - de aire comprimido, 202; - térmicos, 346 y sigtes (Véase *Máquinas de vapor*, *Motores de explosión*); - eléctricos (Véase *Motores eléctricos*).
- Motores de explosión** : Motores de explosión, motores de automóviles, 355; funcionamiento de los - Grossley, - de Dion, - rotatorios Gnome, 356; motor Diesel de combustión interna, 356; ciclo o diagrama de los -, valuación del trabajo de los -, 358.
- Motores eléctricos** : - de corriente continua, 854; - de corrientes alternas, simples y de varias fases, sincrónicos y asincrónicos, 870; aplicaciones de los - a las máquinas herramientas, a la tracción, tranvías, ferrocarriles y automóviles eléctricos, 1011 y sigtes.
- Movimiento** : Definición, 59; - uniforme, 60; - variado rectilíneo, 61; - rectilíneo uniformemente variado, 62, 63; - curvilíneo, 64; - circular uniforme, 65, 82, 83; de un cuerpo sólido, - de translación, - de rotación, helicoidal, 66; - de caída de los cuerpos, 68 y sigtes (Véase *Caída de los Cuerpos*); - de los proyectiles, 85, 86; - oscilatorio pendular o sinusoidal, 103 y sigtes (Véase *Péndulo*); - vibratorio, 389 y sigtes (Véase *Vibraciones*).
- Móvil** : 59.
- Músculos** : Trabajo de los -, 375.
- Música** : Intervalos musicales, gamas, acordes, 407 y sigtes.

N

- Natterer (Tubos de -)**, 307, 325.
- Navegación aérea** : 185.
- Nefoscopio** : 1082.
- Negro (Cuerpo -, o radiador integral)** : 608, 619, 620.
- Neumática** : 150 y sigtes.
- Neumáticas (Máquinas)** : Véase *Bombas*.
- Niágara eléctrico** : 1088.
- Nicol (Prisma de -)** : 682.
- Nieblas** : 1055.
- Nieve** : 1057.
- Nimbos** : 1052.
- Niquelado** : 995.

Nitrógeno (Fijación del - atmosférico, por la energía eléctrica) : 1009.

Nivel : de albañil, 39; - de agua, 133; - de burbuja de aire. - esférico, 134.

Nivel eléctrico : o potencial (Véase *Potencial eléctrico*).

Nivel : Superficies de -; en un fluido en equilibrio, 131; - eléctrico o superficies equipotenciales, 916.

Nivelación : 133; - barométrica, 163.

Nodos de vibración : 432, 433; - en las cuerdas vibrantes, 432, 443; - en los tubos sonoros, 446, 447.

Nonio o vernier : 13.

Notas musicales : 407 y sigtes.

Nubes : 1052; formación de las -, 1053; electrización de las -, 1059, 1061; estudio de la marcha de las -, 1082.

O

Objetivos : - de los microscopios, 582; - fotográficos, 644.

Obturadores fotográficos : 646.

Oculares : - simples (o lente), 575; - compuestos negativo de Huygóns y positivo de Ramsden, 582; - terrestre, 595.

Odógrafo : 64.

Ørstedt : Piezómetro de -, 226; experimento de -, referente a la acción de una corriente sobre un imán, 787.

Oftalmómetro de Javal y **Oftalmofacómetro de Tcherning** : 561.

Oftalmoscopio : 561.

Ohm : Leyes de -, sobre la resistencia de un conductor cilíndrico, 764; ley de - relativa a un circuito cerrado, 767; ley de - sobre la diferencia de potenciales entre dos puntos de un circuito y aplicaciones, 773, 774.

Ohmio (unidad de resistencia eléctrica) : Definición, - tipo, 763.

Oído : 454 y sigtes.

Ojo humano : 555 y sigtes (Véase *Visión*).

Ondas : - transversales sobre una cuerda elástica, 417; - en la superficie de un líquido, 417; - longitudinales, sonoras, 418, 419; - luminosas, 664 y sigtes; - electro-magnéticas, 987 y sigtes.

Ondas estacionarias : - en los movimientos vibratorios, 432 y sigtes; - sonoras, 432, 433, 443, 446; - luminosas, 665, 668.

Ondímetros : 1029.

Ondógrafo : 857.

Ondulaciones (Teoría de las -) : 661.

Opacos (Cuerpos -) : 456.

Óptica : 456 y sigtes.

Ornitópteros : 187.

Ortocromática (Fotografía -) : 659.

Oscilaciones : de un péndulo, 103 y sigtes; de una lámina vibrante, 389 y sigtes.

Oscilaciones eléctricas : 985 y sigtes.

Oscilógrafo : 857.

Osmoregulador : 968.

Osmosis : 339; - eléctrica, 779.

Osmótica (Presión -) : 339.

Ozonización : 1010.

P

Palancas : Equilibrio de las -, - de primero, segundo y tercer orden, 38; transformación del trabajo por las -, 93.

Palmer : 17.

Pantallas eléctricas : 902.

Pantelégrafo : 1024.

Paralelogramo de las fuerzas : 31.

Paralelos magnéticos : 711.

Pararrayos : 872, 1021.

Pararrayos : - de Franklin, 1066; - de Mel-sens, 1067.

Pared fría (Principio de la -) : 285.

Par terrestre : 702.

Pares de fuerza : 32.

Pares termoeléctricos : 241, 756 y sigtes.

Parhelios : 1071.

Pascal (Principio de -) : 124.

Pathégrafo : 401.

Péndulo : Definiciones, - compuesto y - simple, movimiento oscilatorio, 103; leyes del isocronismo y del decrecimiento de las amplitudes, 104; medida de la duración de las oscilaciones de un -, método de las coincidencias, 105; leyes del - simple, 106; teoría del - simple, fórmula del - simple, 107; comparación de la fórmula del - simple y del experimento, 108; - compuesto, - simple sincrónico, reversible, 109; teoría del - compuesto, 110; aplicaciones del - a la medida de *g*, 111 y sigtes.; - de Foucault, 115; aplicación del - a la medida del tiempo, 116 y sigtes.

Péndulos compensadores : de Leroy, - de Graham, 248.

Péndulos eléctricos : 721.

Penumbra : 458.

Periódicos (Movimientos -) : movimiento pendular (véase *Péndulo*); movimiento oscilatorio simple, de una lámina o de

- un diapasón, 391, - en general, descomposición de un - on movimientos oscilatorios simples, 391.
- Periodo** : - de un movimiento circular uniforme, 65; - de un movimiento oscilatorio o vibratorio, 107, 392; - de las vibraciones luminosas, 666; - de una corriente alterna, 855; - de las oscilaciones eléctricas, 985.
- Periscopio** : 142.
- Permeabilidad magnética** : 826.
- Permeámetro** : 824.
- Persistencia de las impresiones luminosas** : 568.
- Pesa ácidos. Pesa jarabes. Pesa sales, Pesa espíritus** : 148.
- Pesada** : simple, 48; doble - de Borda, - de carga constante, 49; correcciones de las -, 181.
- Peso** : Definición, 23, 38; relación del - con la masa, 57, 77; intensidad del -, 41; - aparente, 181.
- Peso específico** : 58.
- Pesón** : 26.
- Picnómetros** : 145.
- Piezo-electricidad** : 976.
- Piezómetro** : 226.
- Pilas** : Definición, 715; - de Volta, 720, 736, 751; - de Bunsen, - de Marié-Davy, - de Lalande y Chaperon, - de bicromato, - Leclanché, - sin líquido libre; - de bióxido de plomo, o - *silicia*, 752; - de Becquerel (llamada de Daniell), 753; - Callaud, 754; - tipos, - Latimer-Clark, - Gouy, - Weston, 755; - termoeléctricas, 757; apareamiento de las - en tensión, 719, 769; apareamiento de las - en batería; apareamiento mixto, en oposición, 769; constantes de una -, 768; polarización de las -, 751; - impolarizables, 752 y sigtes.
- Pincel luminoso** : 457.
- Pipeta** : 212.
- Pirheliómetros** : 1072.
- Pirometria Pirómetros (Pirómetro de cuadrante, pirómetro óptico de Le Chatelier, pirómetro Fery)** : 242.
- Placas fotográficas** : 648, 653, 661.
- Plano inclinado** : 36; movimiento on un -, 73, 76; trabajo en el -, 93.
- Planos conjugados** : - en los espejos esféricos, 488; - en las lentes, 530, 541.
- Planos principales** : - en las lentes gruesas, 549; - en sistemas dióptricos concentrados, 550.
- Plateado galvánico** : 993.
- Plomada** : 39; aplicaciones de la - 39; desviación de la - por las montañas, 89; desviación de la - por el movimiento terrestre, 112.
- Plotes (Transvías eléctricos de -)** : 1013.
- Pluviómetros** : 1054.
- Poder absorbente** : 629.
- Poder de las puntas (Véase *Puntas*)**.
- Poder difusivo** : 628.
- Poder emisivo** : 618.
- Poder inductor específico** : 938.
- Poder reflector** : 628.
- Poder rotatorio** : 687, 688.
- Poder separador** : - del ojo, 565; - de un instrumento de óptica, 674.
- Polarímetro** : 689.
- Polarización de la luz** : 681 y sigtos.; - rotatoria, 687 y sigtes.
- Polarización (Plano de -)** : 686.
- Polarización de las pilas** : 751.
- Polarización de los electrodos** : 742 y sigtes.
- Polarizadores** : 681, 682, 683, 684.
- Polea** : 34, 93.
- Polifaseadas (Corrientes -)** : Definición de las -, 865; producción de las -, 866; transporte de las -, 867; aplicaciones de las - en los motores de campo giratorio, 868, 869, 870; transformaciones de las -, 871, 873, 874.
- Polonio** : 971, 980.
- Polos** : - de los imanes, 691, 700; - de los generadores de corriente, 715.
- Polos magnéticos del globo** : 708, 711.
- Portavoz** : 422.
- Potencia mecánica** : Definición, unidades de -, 92; medida de la - de un motor, 358, 359; - de una pila o de un generador cualquiera de corriente, 738; - de una dinamo, 851; - de un motor eléctrico, 854; dimensiones de una -, 1094.
- Potencia óptica** : - de una lente, 534, 542; - de un sistema de lentes, 547; - de una lente, 575, 676; - de un microscopio, 581.
- Potencial eléctrico** : Diferencia de - entre dos conductores, definiciones, 770, 771, 772, 910; diferencia de - entre un conductor y el suelo, - de un conductor, 910; constancia del - en los diferentes puntos de un conductor, 911; diferencia de - entre dos puntos de un circuito, 773, 774, 776; diferencia de - entre los polos de un generador de corriente, 775; diferencia de - en el contacto de dos conductores, ley de Volta, ley de Pellat, 778; variación del - en la influencia, 913; diferencias de - entre dos puntos de un

campo, 914 y sigtes.; expresión de la fuerza en función del -, 917; cálculo del -, 918, 919; medida de las diferencias de - por los voltímetros, 818; medida de las diferencias de - por los electrómetros, 945 y sigtes.

Potencial (Energía -) : 100, 101.

Potenciómetro : 777.

Pozos artesianos : 135.

Precisión de una medida : 11.

Prensa de forjar : 130.

Prensa hidráulica : 129; aplicaciones de la -, 130.

Presbicia : 560.

Presiones : Definición, 29; - en los líquidos, 120 y sigtes.; transmisión de las -, 124; - en el fondo de los mares, 126; - en una pared plana lateral, 127; - en el conjunto de las paredes de un vaso, 128; - en un cuerpo sumergido en un fluido, 136, 180; en los gases, 151 y sigtes.; - atmosférica y barómetros, 151 y sigtes. (Véase *Barómetros*); medida de las - en los gases, manómetros, 164 y sigtes. (Véase *Manómetros*); unidades de -, 29, 156; dimensiones de una -, 1094.

Presión máxima de un vapor : Definición, 284; medida, 286, 287.

Presión de radiación : 634.

Previsión del tiempo : 1081 y sigtes. Método de Guilbert, 1087.

Prisma : Definición, refracción en la sección principal, 517; fórmulas del - 518; estudio de la desviación producida por un -, 519, 520; condiciones de emergencias, 521; - de reflexión total, 522; imágenes dadas por un -, 523; aplicación del - a la medida de los índices de refracción, 524, 525.

Problemas de física : página 895.

Propagación de las vibraciones y del sonido : 416 y sigtes.

Propagación de la luz : Propagación rectilínea, 457 y sigtes.; velocidad de -, 460.

Protección de las cosechas : 1088.

Proyección (Instrumentos o linternas de -) 573 y sig.; proyecciones en colores, 661.

Proyectiles (Movimiento de los -) : 85, 86; comparación del - con el movimiento de los planetas, 88.

Puente de Wheatstone : 783.

Pulsaciones de los sonidos : 434.

Puntas (Poder de las -) : 892; - en la influencia, 900; - en las máquinas eléctricas; 923; - en los pararrayos, 1066, 1067.

Punto crítico : 307, 323; cuadro de los -, página 928.

Punto de fusión : 275; cuadro de -, página 925.

Punto de ebullición : 291; cuadro de -, página 925.

Punto de rocío : 341.

Punto triple : 330.

Punto ocular : 583.

Purkinje (Imágenes de -) : 561.

Q

Química (Objeto de la -) : 4.

Quinetoscopio : 397.

R

Radiaciones : Definición de - 602; propiedades de - 602 y sig.; - solar, 600, 633; - visibles, infra rojas y ultra violadas, 602, 614; - longitudes de onda, período y frecuencia de - 614, 665, 666, 675; estudio de - de diversos focos, 615 y sig.; emisión de - por incandescencia, 618 y sig.; emisión de - por los gases y los vapores, 623; emisión de - por luminiscencia, fosforescencia y fluorescencia, 622, 639, 640; acciones de los cuerpos sobre las -, reflexión, difusión, absorción, transmisión de -, 628 y sig.; colores de -. 641; acciones químicas y biológicas de - 662, 663.

Radiadores : - de los aparatos de calefacción, 386, 387; - de los automóviles, 356; - eléctricos, 1008.

Radiador integral : 618.

Radio : 974 y sigtes. (Véase *Radioactividad*).

Radioactividad : Historia, 974; diversos efectos de la irradiación del radio, efectos fotográficos. y químicos, de fosforescencia y de coloraciones, fisiológicos, 975; medida de la - 976; caracteres de la -, preparación del radio; 977; naturaleza de la irradiación del radio, rayos α β γ , 978; calor desprendido por los cuerpos radioactivos, 979; teoría de la -, transformaciones de los cuerpos radioactivos, 980; producción de helio a partir de los elementos radioactivos, relaciones entre los pesos atómicos de estos elementos, 981; origen de la energía desprendida por los cuerpos radioactivos, 982; - de diversos cuerpos, 983; patrón de radio, 984.

Radiosconductores : 1027.

Radiocroismo : 970.

Radiocronómetro : 970.

Radiografía : 968, 969.

Radiómetro : 241.

Radiomicrómetro : 241.

- Radioscopia** : 968, 969.
- Radiotelegrafía** (Véase *Telegrafía sin alambres*).
- Radioterapia** : 969.
- Rayas (de los espectros)** : - de los vapores y de los gases, 623 y sigtes.; - del espectro solar, 633; - teluricas, 634; inversión de las -, 632.
- Rayo** : 1064.
- Rayos** : - de propagación de las ondas, - sonoros, 419; - luminosos, 457; - infrarrojos y ultraviolados, 602, 614; catódicos, 962, 963; - canales de Goldstein, 964; de Lenard, 966.
- Rayos X (o Rayos de Röntgen)** : 967; propagación rectilínea de los -, radioscopia y radiografía, 968; aplicaciones de los -, radioterapia, 969; transparencia de los cuerpos por los -, experimentos y leyes de Benoist, radiocroísmo, radiocronómetro, 970; transformaciones de los rayos X por la materia, - secundarios, - terciarios, 971; naturaleza de los -, 972; ionización de los gases por los -, 973.
- Rayos de Becquerel o rayos de radio** : véase *Radioactividad*.
- Reacción (Acción y -)** : 25.
- Recalentamiento del vapor** : 346, 349; - en las locomotoras, 353.
- Receptoras (Máquinas)** : - de corriente continua, 854; - de corrientes alternas, 870.
- Recipientes para gases comprimidos y licuados** : 200, 311.
- Redes** : 615, 675.
- Reflexión** : - de las sacudidas y de las vibraciones, - del sonido, 424 y sigtes.; de la luz, 470 y sigtes.; - del calor radiante, 609; - de las ondas electro magnéticas, 988, 989.
- Reflexión total** : 513; prisma de -, 522; aplicación de la - a la medida de los índices de refracción, 524.
- Refracción** : - de las ondas y del sonido, 428, 429, 430; - de la luz, 503 y sigtes.; - atmosférica, 511; - del calor radiante, 610, de las ondas electromagnéticas, 988.
- Refractómetros** : 524, 525.
- Refrigeración por los gases licuados** : 313.
- Refuerzos telegráficos** : 1021.
- Refuerzo de los sonidos** : 422, 449 y sigtes.
- Registradores (Aparatos -)** : Véase *Registro*.
- Registro gráfico** : - del movimiento de la caída de un cuerpo, 71; - de la presión atmosférica, barómetro registrador, 162; - de la presión de un gas o de un vapor, manómetro registrador, 170; - de la temperatura, termómetro registrador, 240; - del estado higrométrico, higrometro registrador, 344; de las oscilaciones de un péndulo, 390; de un movimiento cualquiera, cronógrafo registrador, 390; - de las indicaciones de los aparatos de medidas eléctricas, 821.
- Registro fotográfico de las indicaciones de los aparatos de medidas**, 481.
- Regla de Ampère** : 787.
- Regla de Huygens** : 506.
- Reglas graduadas** : 12.
- Regreso inverso de la luz** : - en la reflexión, 473; - en la refracción, 508.
- Regulador de fuerza centrífuga** : 83, 351.
- Reguladores de presión** : 201.
- Reguladores de temperatura (o termóstatos)**; 243.
- Reguladores de lámparas de arco** : 1004.
- Relámpago** : 1062.
- Relieve (Sensación del -)** : 571; reproducción de la - por la estereoscopia, 658.
- Relojes** : 116; - neumáticos, 202; compensación de los balancines de los -, 248; - de bolsillo, 117.
- Reluctancia** : 826.
- Rendimiento** : - de una máquina, 95; - de un motor térmico, 369 y sigtes.; - de una dinamo, 851; - de un motor eléctrico, 854; - de un transformador, 871.
- Reógráfico** : 857.
- Reóstatos** : 717.
- Replenisher** : 921.
- Repulsiones eléctricas** : 723; explicaciones de las -, 898.
- Resistencia del aire al movimiento** : Leyes de la - 80; aplicación de la - 81; aplicación de la - a los aeroplanos, 187.
- Resistencia de los sólidos a las deformaciones** : 28
- Resistencia de los fluidos al movimiento** : 80.
- Resistencias pasivas** : 94.
- Resistencia eléctrica** : noción de -, 717; definición de la -, 763, unidades de -, 763, 847, 1097; leyes sobre la -, de un conductor cilíndrico, 764; resistencia específica, 765; causas diversas que varían la - de un conductor, 765; comparación de las -, por el puente de Wheatstone, 783 y sigtes.; medida absoluta de una -, 849; - aparente de un circuito en las corrientes alternas, 862.
- Resistencias (Cajas de -)** : 784.
- Resistencia magnética** : 826.
- Resistividad** : 765; cuadro de - de los sólidos, de los líquidos y de las soluciones, pág. 926.

Resonadores : - de Holmholz y de Kœning, 450; - eléctricos del Dr. Oudin, 1046; - eléctricos de Hertz, 987.

Resonancia. Fenómenos de -, 449; aplicación de la - al análisis de los sonidos, 450 y sigtes.; - eléctrica, 987; - eléctrica múltiple, 990.

Resultante de un sistema de fuerzas : 30; concurrentes, 31; - paralelas, 32.

Reticulo de un anteojo, 590.

Revelación de las imágenes fotográficas. -

Reveladores : 649.

Reversibilidad : - de las transformaciones, 314; de la fusión, 329; de la vaporización, 322; - de la sublimación, 328; - de las máquinas térmicas, 369, 370; - de las máquinas de corriente continua, 854; - de los alternadores, 870; - de las máquinas eléctricas, 958.

Roberval (Balanza de -) : 54.

Rocio : 1056; punto de -, 341.

Romana (Balanza -) : 55.

Rompevejigas : 151.

Rosa de los vientos : 1048.

Rosa de una brújula marina : 706.

Rotación (Movimiento de -) : 66.

Rotación : Medida de una pequeña - por el método de reflexión, 480; registro fotográfico de las pequeñas -, 481.

Rotativo (Poder -) : 687.

Rueda de Barlow : 797.

Ruidos : 399.

Rumbos : 1048.

Ruptor atómico : 878,

S

Sacarimetría y sacarímetros : 689.

Salto de agua : 135.

Saturación (Curva de -) : 325.

Saturación de las soluciones : 332.

Saturación magnética : 824.

Saturantes (Vapores -) : 284 y sigtes.

Segundo : 59.

Selenio (Resistencia eléctrica del -) : 765; pilas de -, 1024.

Sensibilidad : - de una balanza, 50, 51; - de un termómetro, 234; - de un galvanómetro, 808.

Sereno : 1056.

Serie (Asociación de las pilas en -) : 719, 769.

Serie (Excitación de las máquinas en -) : 852.

Serie termoelectrica : 758.

Shunt : 782; - de los galvanómetros, 812.

Sifon : 211.

Sifón (Barómetro de -) : 157.

Sifón-recorder : 1026.

Silbato de Galton : 400.

Similigrabado : 658.

Simùn : 1048.

Síntesis de los sonidos : 451, 452.

Síntesis de la luz blanca : 641.

Sintonía (en telégrafo sin hilos) : 1032.

Sinusoidal (Movimiento -) : 107, 391, 392.

Sirena de Cagniard de Latour : 406.

Siroco : 1048.

Sistemas dióptricos centrados : 550.

Sobrefusión : 277.

Sobresaturación : - de las soluciones, 333; - de los vapores, 322, 973.

Sol : Radiaciones del -, 600, 633; constitución del -, 634; temperatura del -, 635; cantidad de calor emanada del -, constante solar, 1072; origen de la energía del -, 374.

Solenoides : Definición, 791; campo magnético de los -, 791, 795; acción de los - sobre los imanes, 791; acción de los imanes sobre los -, 801; acción de la tierra sobre los -, 800; acciones mutuas de los -, 804; analogía y diferencias de los - y de los imanes, 831.

Solidificación : 276 y sigtes.

Sólidos : Definición, 1; equilibrio de los -, 24; deformaciones de los - bajo la acción de las fuerzas, 28; equilibrio de los - graves, 43, 44; movimientos de los -, 66; dilatación de los -, 229, 244 y sigtes.; fusión de los -, 275 y sigtes., 329; sublimación de los -, 288, 328; emisión de las radiaciones por los -, 618.

Solubilidad : - de los gases en los líquidos, 179; - de los sólidos en los líquidos, 332 y sigtes.; curvas de - de los sólidos, 332.

Soluciones : Concentración y saturación de las -, 332; cristalización de las -, sobresaturación, 333; fenómenos que se producen cuando se enfrían las -, eutexia, crioscopia, 334, 336; presiones máximas de los -, tonomotría, 337; punto de ebullición de las -, ebulloscopia, 338; difusión de los líquidos, ósmosis, presión osmótica, 339.

Sombras : 458.

Sondas aéreas : 186.

Sonidos : Definición y cualidades de los -, 399 y sigtes.; producción de los -, 400, 440 y sig., 445 y sig.; reproducción de - fonógrafos, 404; medida de la altura de los -, 406; clasificación de los intervalos

musicales, gamas, 407 y sigtes.; propagación de los sonidos en los sólidos, los líquidos y los gases, 416 y sigtes.; reflexión de los -, ecos y resonancias, 421 y sigtes.; refracción de los -, 429, 430; interferencias de los -, 431 y sigtes.: 443, 446; velocidad de los - en los gases, los líquidos y los sólidos, 435 y sigtes.; análisis y síntesis de los -, 450 y sigtes.; percepción de los -, 454 y sigtes.

Sonómetro : 440.

Sostenidos : 411.

Speaking-tubos : 422.

Stefan (Ley de) : 619.

Sublimación : 288, 328.

Submarinos (Buques -) : 142.

Submersibles (Buques -) : 142.

Superficie (Unidad de -) : 9, 1091.

Superficie libre de un líquido : 131.

Superficies equipotenciales : 916.

Superficies de nivel : - hidrostáticas, 131; - eléctricas, 916.

Suspensión de Cardan : 706.

T

Tara : 49; globo - de Regnault : 261.

Tara de un recipiente : 173, 252, 262.

Teleautograbador : 1024.

Teleautógrafo : 1024.

Telefonía : Definiciones, 1034; diversos teléfonos, 1035, 1036; micrófono de Hughes, 1037; transmisores microfónicos, 1038; perfeccionamiento de Edison, empleo del carrete de inducción, 1040; teléfonos y micrófonos combinados, 1039; redes telefónicas, 1041; - sin hilos, 1042.

Teléfonos : - Bell, 1035; - Ader; - inscriptor Dussaud, 1036.

Telegrafía : 1016 y sigtes (Véase *Telégrafos*).

Telegrafía sin hilos o radiotelegrafía : Aplicación de las ondas hertzianas a la -, 1027; aplicación del cohesor a la -, 1028; perfeccionamientos en los aparatos generadores de las oscilaciones, 1029; emisión indirecta, 1030; nuevos detectores, 1031; recepción indirecta, sintonización, ondas musicales, ondas dirigidas, 1032; distancia de las estaciones, - aplicaciones diversas, 1033.

Telegrafía submarina : principios de la -, 1025; sifón-recorder, 1026.

Telégrafos : Principio de los -, órganos diversos de los -, 1016; - Bréguet, 1019; - Morse, 1020; órganos accesorios de

los -, pararrayos timbres, onlances, 1021; - impresores, - Hughes, 1022; - de transmisión rápida, jacquard eléctrico, duplex, diplex y cuádruplex, 1023; transmisión telegráfica de escritura y dibujos, pantelégrafo, teleautógrafo, telautograbador, 1024.

Telescopios : - de Newton, 598; - de Foucault, 599.

Temperamento : 413.

Temperatura : Noción de -, 228; principio de la medida de las -, 230; medida de la - por medio de termómetros, 231 y sigtes (Véase *Termómetros*); medida de pequeñas diferencias de -, par termoelectrico, aguja termoelectrica, pilas termoelectricas, radiómetro, radiomicrometro, bolómetro, 241; medida de - elevadas, pirometría, 242; - absoluta, 236; - media de un lugar, 1073; repartición de las - en la superficie del globo, 1074 y sigtes; - de los mares, 1078; - de los lagos y de los manantiales, 1079.

Tempestades : 1062 y sigtes.

Tempestades magnéticas : 708.

Tenacidad : 28.

Tensión (Asociación de pilas en -) : 718, 769.

Tensión eléctrica : 891, 908.

Tensión máxima (de un vapor). (Véase *Presión máxima*.)

Tensión superficial : 216; origen de la -, 217; consecuencias de la -, 218 y sigtes; medida de la -, 222.

Teorías : - cinética de los gases, 3; mecánica del calor, 102, 360 y sigtes; - de las ondulaciones de la luz, 614, 661 y sigtes; - de la electrólisis, 735; - del magnetismo, 831; - electromagnética de la luz, 988.

Termodinámica (Nociones de -) : 360 y sigtes.

Termoelectricidad : Corrientes termoelectricas, 756; pares y pila termoelectrica, pila Clamond, 757; serie termoelectrica, 758; leyes de las fuerzas electromotrices termoelectricas, 759; origen de las corrientes termoelectricas, efecto Peltier, efecto Thomson, 760; aplicación de la - a la medida de las temperaturas, 241.

Termometría : 230 y sigtes (Véase *Termómetros*).

Termómetros : - de mercurio, 231 y sigtes; - de gas, - normal, - de hidrógeno, 236, 237; - de alcohol, 238; - de máxima y de mínima, - medicales, 239; - registrador, 240; - para pequeñas diferencias de temperatura, par, aguja, pilas termoelectricas, radiómetro, radiomicrometro, bolómetro, 241; - para temperaturas elevadas o pirómetros, 242; - de presión de vapor saturado, 243.

Termo-ósmosis : 339.
Termóstatos : 243.
Tiempo : Unidad de -, 59; medida del - por los relojes y cronómetros, 116, 117, 118.
Tifones : 1049.
Timbre de los sonidos : 399; causa del -, 103.
Tintura : 217.
Tiro de las chimeneas : 382.
Tonel de Pascal : 126.
Tónica : 411.
Tono : - mayor, - menor, semi -, 410; - relativo, 412; semi-medio, 413.
Tonometría : 337.
Tornados : 1050.
Tornillo micrométrico : 15.
Torniquete eléctrico : 892.
Torno : 35, 93.
Torrucelli : Experimento de - sobre la presión atmosférica, 154; principio de - sobre el derramamiento de los líquidos, 223.
Torsión : Elasticidad de -, 28; balanza de torsión de Cavendish, 89.
Trabajo : Definición, 90; unidades de -, 91; - en las máquinas, 93; - muscular, 375; transformaciones del - (Véase *Transformación*).
Tracción (Elasticidad de -) : 28.
Tracción eléctrica : 1012 y sigtes.
Transformadores : 871 y sigtes.
Transformación (del trabajo y de la energía) : - del trabajo en las máquinas, 93; - del trabajo en energía cinética y - inversa, 97 y sigtes; - del trabajo en energía potencial y - inversa, 100; - mutuas de la energía cinética y de la energía potencial, 101; diversas - de la energía, 102; - del trabajo en calor, 102, 360 y sigtes; del calor en trabajo por las máquinas térmicas, 361, 369 y sigtes; - del calor en trabajo por los músculos, 375; - y degradación de la energía, 372; - de la energía solar, 373; - del trabajo en energía eléctrica, 832 y sigtes, 850 y sigtes, 855 y sigtes, 955 y sigtes; - de la energía eléctrica en trabajo, 787 y sigtes, 797, 854, 870, 957 y sigtes; - de la energía eléctrica en calor, 761 y sigtes, 959 y sigtes, 999 y sigtes, 1008; - del calor en energía eléctrica, 757 y sigtes; - de la energía eléctrica en energía química, 728 y sigtes, 991 y sigtes; - de la energía química en energía eléctrica, 736 y sigtes; 742 y sigtes.
Transformación de las corrientes : - alter-

nas, 871; - continuas en corrientes alternas e inversamente, 873, 874.
Transformaciones de los cuerpos : - isothermas, - adiabáticas, - reversibles, 314; - de los gases, 315 y sigtes; - de los líquidos, 320; - de los sólidos, 321; - mutuas de los líquidos y de los vapores, 281 y sigtes, 322 y sigtes; - mutuas de los sólidos y de los vapores, 288, 328; - mutuas de los sólidos y de los líquidos, 275 y sigtes, 329.
Traslación (Movimiento de -) : 66.
Translúcidos (Cuerpos -) : 456.
Transmisión de presiones por los líquidos : 124.
Transmisores : - telegráficos (Véase *Telegrafos*); - telefónicos, microfónicos, 1037 y sigtes.
Transparentes (Cuerpos -) : 456.
Transporte eléctrico de la energía : - por las corrientes continuas, 854; - por las corrientes alternas, 870, 872.
Transposición : 411.
Tranvías : - de aire comprimido, 202; - eléctricos, 1013.
Trayectoria : - de un móvil, 59; - de las depresiones barométricas, 1085.
Tricomasia : 567.
Tricromo (procedimiento - de fotografía de los colores) : 661.
Trifaseadas (Corrientes -) : 865 y sigtes.
Trole : 1013.
Trombas : 1051.
Trombona de Kœnig : 433.
Trompas : - de agua, 193, 198; - de mercurio, 195.
Trompetillas acústicas : 422.
Trueno : 1063.
Tubos para el vacío : de Geisler, 961; - de Crookes, 962; - focos, 968.
Tubos capilares : 214 y sigtes.
Tubo de Newton : 68.
Tubos sonoros : - de boca y - de lengüeta, 444; - leyes experimentales de los -, 445; teoría de los -, 446; investigación de los nodos y vientres en los -, 447; influencia de la naturaleza del gas en la altura del sonido emitido por un - 448.
Turbinas o turbomotores de vapores : 354.
Turmalina (Propiedades ópticas de la -) : 683.

U

Udómetro : 1051.
Ultramicroscopios : 585.

Ultraviolados (Rayos -) : 602, 614; acciones químicas de - 662; acciones biológicas y propiedades bactericidas de, - 663.

Unidades : 7; - de longitud, 8; - fundamentales y derivadas. - de superficie y de volumen, 9; - de fuerza, 26, 78; - de masa, 56, 78; - de presión, 29, 156; de tiempo, 59; - de velocidad, 60; - de aceleración, 62; - de trabajo, 91; - de potencia, 92; - de temperatura, grado centígrado, 236; - de cantidad de calor, 263; - de intensidad luminosa y de iluminación, 461, 468; - de convergencia, 534; - de masa magnética, 694; - de intensidad de campo magnético, 697; - de intensidad de corriente eléctrica, 731, 793, 847; - de cantidad de electricidad y de masa eléctrica, 732, 847, 884, 954; - de fuerza electromotriz y de diferencia de potenciales, 737, 771, 847; - de resistencia eléctrica, 763, 347; - de capacidad eléctrica, 928, 933, 935; relación entre las - eléctricas, 954; cambios de -, 1089 y sigtes.

V

Vacio (Bombas para efectuar el -) : 188 y sigtes; trompas para el -, 194, 195; recipientes para -, 188; limpieza por el -, 202.

Válvulas : - de bombas : 205, 208.

Válvulas de seguridad : 291, 346.

Válvulas electrolíticas : 861.

Van der Waals (Fórmula de -) : 318.

Vapores : Formación de los - en el vacío, 284 y sigtes; - saturantes o saturados, 284 y sigtes; - presión máxima de los -, 284 y sigtes; producción de los - por sublimación, 288; mezcla de gases y -, 289; producción de los - por evaporación, 290; producción de los - por ebullición, 291 sigtes; densidad de los -, 299 y sigtes; masa de un volumen de aire que contiene vapor de agua, 304, 345; relación entre el volumen de un líquido y el de su vapor, 305; licuefacción o condensación de los - 306; equilibrio de un líquido en presencia de su vapor, 322 y sigtes; equilibrio de un sólido en presencia de su vapor, 328.

Vaporización : - en el vacío, 284 y sigtes; - en los gases, 289; - total, 307, 325; calor de -, 296 y sigtes; calor de - de los gases licuados, 326; - de los sólidos o sublimación, 288, 328; cuadro de los calores de - pág. 925.

Vatio (unidad de potencia) : 92.

Vatio-hora : 738.

Vaso o frasco de Mariotte : 224.

Vasos comunicantes : 132.

Vectores : 27.

Vehículo del anteojo terrestre : 595.

Velocidad : de un movimiento uniforme, unidad de -, 60; - de un movimiento variado rectilíneo, 61; - de un movimiento curvilíneo, 64; - de un movimiento circular uniforme, - angular, 65; - de caída de los cuerpos, 69, 70; - límite de la caída en el aire, 81.

Velocidad de evaporación : 290.

Velocidad del sonido : - en el aire, 435; - en los gases distintos del aire, 436; leyes de la - en los gases, 437; - en los líquidos, 438; - en los sólidos, 439.

Velocidad de la luz : Métodos astronómicos, principio del método de Rømer, cálculos de Delambre, métodos físicos, experimentos de Fizeau, principio de su método, 460.

Velocidad del calor radiante : 605.

Velocidad de las ondas electromagnéticas : 988.

Vernier o nonio : 13.

Vertical : 40.

Vibraciones : Definiciones, estudio experimental y teórico, 389 y sigtes; - sonoras, 399 y sigtes; propagación de las -, 416 y sigtes; - transversales y longitudinales, 417, 418; reflexión, refracción, interferencias de las -, 424 y sigtes; - transversales de las cuerdas, 410 y sig. : - de los gases en los tubos sonoros, 444 y sigtes; - luminosas, 604 y sigtes.

Viento eléctrico : 892.

Vientos : Sus causas, regulares o alisios, periódicos, monzones, simún, brisas; - variables, 1048 y sigtes.

Viscosidad : 217.

Visión : estructura del ojo humano, 555; mecanismo de la -, 556; línea visual, campo de - clara, diámetro aparente, 557; acomodación, 558; enmetropia, miopia, hipermetropia, 559; presbicia, 560; mecanismo de la acomodación, imágenes de Purkinje, 561; aberraciones del ojo, 562; astigmatismo, 563; oftalmoscopio, 564; agudeza visual, 565; sentido de claridad, 566; - de los colores, 567; persistencia de la impresión luminosa, 568; imágenes secundarias, contraste de los colores, 569; campo visual, experimento de Mariotte y de Troxler, 570; - binocular, sensación del relieve, 571, 658; apreciación de la distancia, 572.

Vocales : 452.

Volantes : 99, 347.
Voltámetro : 728.
Voltímetros : 818; - electrostáticos, 951.
Voltio : 727, 737, 771.
Volumen : Unidad de -, 9, 1091; determinación del volumen de un sólido, 138.
Volumen específico : 58.
Voz humana (Sonidos de la -) : 452.

W

Watter-ballast : 142.
Watt (Principio de -) : 285.
Wien (Ley de - sobre la irradiación) : 620.
Wimshurst (Máquina eléctrica de -) : 923.

Z

Zonas climatológicas : 1075.
Zootropio : 397.

TABLA ALFABÉTICA

DE LOS NOMBRES DE AUTORES

A

Abady 466.
 Abbadié (d') 708.
 Abbe 524.
 Abbot 1072.
 Abraham 421, 857, 944, 951.
 Abraham (Max) 978.
 Ader 356, 1036, 1038.
 Airy 113, 706.
 Alluard 341.
 Altberg 400.
 Alvergniat 192, 194.
 Amagat 159, 168, 174, 175, 176, 225, 227, 252, 254, 259, 280, 318, 323, 324, 327, 525.
 Amici 616.
 Ampère 317, 787, 802, 831.
 André 1088.
 Andrews 166, 320, 323.
 Angot 646, 1074.
 Angström 633, 1072.
 Arago 1068.
 Archdeacon 187.
 Archimède 136.
 Armagnat 877.
 Arnoux 817.
 Arrhénius 374, 735, 1068.
 Arsonval (d') 196, 241, 311, 814, 1044, 1046.
 Assmann 274.
 Atwater 375.
 Atwood 72.
 Aubert 339.
 Auer 621.
 August 342.

B

Auvert 1014.
 Avogadro 317.
 Ayrton 1015.
 Babinet 163.
 Bacon 460.
 Bailleux 1058.
 Bakewell 1024.
 Barkla 971.
 Bartoli 634.
 Baudot 1023.
 Baumé 148.
 Beauchamp (de) 1088.
 Beaumont 360.
 Becquerel (A.-C.) 241, 753, 758, 760.
 Becquerel (E.) 639, 640, 660, 765.
 Becquerel (II.) 974, 975, 978.
 Bell 1035.
 Bellani 239.
 Bémont 977.
 Benedito 1047.
 Benoist 396, 398, 970, 973.
 Benoît 8, 22, 52, 56, 765.
 Bensenberg 68.
 Bérard 273.
 Berget 115, 378.
 Berjonneau 1024.
 Bernouilli 445.
 Berthelot (M.) 267, 269, 296, 744, 959, 975, 1009.
 Berthelot (D.) 662.
 Berthier 658.

Borthollet 177.
 Bertrand 888.
 Bertsch 656.
 Besson 1047.
 Bichat 950.
 Bidwell 1024.
 Biot 104, 422, 439, 687, 688.
 Birkeland 1009, 1069.
 Bjerknes 990.
 Black, 283.
 Blériot 187.
 Bloch (E.) 973.
 Blondel 452, 857, 1003.
 Blondlot 944, 950, 972, 988, 989.
 Bocquillon 991.
 Bohn 975.
 Boll 555.
 Boltwood 974, 984.
 Boltzmann 619, 634.
 Bonetti 923.
 Bonnier (P.) 455.
 Borda 22, 49, 104, 111, 1081.
 Bordas 83, 196, 975.
 Bose 988.
 Boudréaux 136.
 Bouguer 89, 462.
 Bourdon 161, 169.
 Boutigny 295.
 Bouton 356.
 Bouty 744, 765, 952, 961.
 Boyle 171.
 Boys 89, 241.
 Bradley 460.
 Bramah 129.
 Branly 947, 1027.
 Bréguet 1019.

Bremer 1003.
 Brewster 658, 678, 684.
 Brongersma 944.
 Brunhes 708, 711.
 Brünner 707, 708, 710.
 Buff 864.
 Hutton 552.
 Buisson 56, 1068.
 Bunau - Varilla (Ph.) 388, 1011.
 Bunsen 268, 465, 624, 752.
 Burckhardt 189.
 Burgess 89.
 Buys - Ballot 1081, 1084.

C

Cagniard de Latour 307, 406.
 Cailletet 80, 167; 174, 225, 252, 287, 308, 309, 323, 324, 765.
 Caldwell 881.
 Caligny (de), 202.
 Callaud 754.
 Canton 225.
 Carbonnelle 1024.
 Cardew 817.
 Carnot 369.
 Caro 1009.
 Carpentier 817, 857, 878.
 Carré (E.) 190, 298, 313.
 Carvalló 796.
 Caselli 1024.
 Cassini 708.

- Cavendish 89.
 Celsuis 233.
 Cernovodeanu 663.
 Chabaud 195.
 Chagnaud 203.
 Chanute 187.
 Chaperon 752.
 Chappuis (J.) 326, 864.
 Chappuis (P.) 56, 237, 765.
 Charles 183.
 Charpy 584.
 Chauveau 375.
 Chauvin 817.
 Chevreul 569.
 Chevrotton (Mille) 397.
 Chladni 439.
 Clamond 757.
 Claude 196, 310, 313, 1007.
 Clausius 318.
 Clément 274.
 Colardeau 80, 287.
 Colas 655.
 Colin 1042.
 Colladon 202, 225, 438.
 Collot 52, 53.
 Comandon 585.
 Combes 381.
 Condamine (La) 89.
 Contremoulins 880.
 Cooper-Hewitt 1007.
 Cornu 460, 466, 584.
 Cotton 585, 944.
 Coulomb 693, 881, 889.
 Courmont 663.
 Cowles 1008.
 Crémieu 963.
 Crookes 624, 639, 961, 978.
 Cros 404, 660.
 Crova 341, 1072.
 Curie (J.) 976.
 Curie (P.) 53, 974, 977, 978, 979, 980, 983.
 Curie (Mme P.) 974, 977, 978, 980, 981, 984.
 Curtis 354.
- D**
- Dagron 656.
 Daguorro 643.
 Dalibard 1059.
 Dallmeyer 644.
 Dalton 179, 259, 290, 567.
 Daniell 341, 753.
 Danlos 975.
 Darracq 1015.
 David 711.
 Davy 360, 381, 1002.
 Debiérne 974, 977, 979, 980, 981, 981.
 Décobmes 990.
 Defforges 111.
- E**
- Delambre 460.
 De la Rivo 989, 990.
 Delaroche 273.
 Demaille 52.
 Demarcay 625, 977.
 Demény 597.
 Deprez 814, 817, 878.
 Desains 214, 283, 628.
 Descartes 504.
 Desgoffes 129, 168.
 Deslandres 627, 637, 981.
 Desormes 274.
 Despretz 253, 254, 269, 297, 378, 379.
 Dewar 196, 310, 311.
 Diesel 356.
 Dion (de) 356.
 Dollond 604.
 Döppler 637.
 Doyen 397, 1046.
 Driencourt 1033.
 Drion 252.
 Drude 965, 989.
 Ducos du Hauron 658, 660.
 Ducretet 864.
 Duddell 857, 1042.
 Dufau 118.
 Dufour 292.
 Dulong 250, 269, 271.
 Dumas 301, 468.
 Dupré 216.
 Dupuis 658.
 Dupuis de Lôme 185.
 Dussaud 397, 574, 1036.
 Dutrochet 339.
- F**
- Eder 625.
 Edison 397, 401, 750, 1024, 1040.
 Edoux 130.
 Eiffel 80.
 Elckington 993.
 Esnault-Peltorie 187.
 Estanave 658.
 Ewing 825.
 Eyde 1009.
- G**
- Fahrinheit 233.
 Faraday 290, 733, 832, 886, 896, 901.
 Faria (de) 864.
 Faure 745.
 Favre 269, 326, 363.
 Fæddersen 985.
 Ferber 187.
 Ferrand 1014.
 Ferrié 1031, 1033.
 Féry 212, 619, 635.
 Fitz-Roy 1081.
 Fizeau 247, 460, 671, 875.
- Flammarion 68.
 Flinder 706.
 Folgheraiter 711.
 Fortin 160.
 Foucault 115, 460, 462, 463, 502, 599, 664, 879, 1004.
 Fourier 377, 394.
 Fournier 201, 243, 274.
 Fowle 1072.
 Frank 1009.
 Frankenheim 214.
 Franklin 293, 943, 1059, 1066.
 Franz 378.
 Frauhofér 633.
 Fresnel 552, 668, 679, 680, 685, 686.
 Fron 1081.
 Fuller 1018.
- H**
- Gaëde 193, 1029.
 Galiléo 68, 73, 150, 460, 596.
 Galitzine 325.
 Gallé 1047.
 Galli-Gajalat 168.
 Galton 400.
 Gaudechon 662.
 Gaulard 871.
 Gaumont 397, 405, 661.
 Gauss 713.
 Gay-Lussac 149, 214, 255, 259, 274, 277, 286, 365, 1052.
 Geissler 961.
 Geitel 981.
 Gerlach 619.
 Gernez 277, 292.
 Géricke 191.
 Gibbs 331.
 Giesel 975, 978.
 Giffard 185, 351.
 Gilbert 712.
 Giltay 1021.
 Girard 656.
 Giurgea 944.
 Goldstein 964.
 Gossart 295.
 Goulier 163.
 Gouy 625, 755.
 Govi 466.
 Graham 178, 218.
 Gramme 850, 855.
 Gramont (Arnaud de) 616, 625.
 Grassi 225.
 Gray 1024.
 Griffiths 1077.
 Grossmann 1047.
 Grumbach 779.
 Gruhn 1021.
 Guglielmi 68.
 Guericko (Otto de) 150.
 Guilbert 1017.
 Guillaumo 22, 56, 618, 765, 999.
- Guilleminot 971.
 Guillet (A.) 118.
 Guillet (L.) 584.
 Guillon 658.
 Gurney 385.
 Guye (E.) 1002.
- H**
- Hagen 988.
 Hahn 974, 981.
 Halske 856.
 Hall 765.
 Hartley 625.
 Hartmann 817.
 Hecker 114.
 Hefner 468.
 Helmer 853, 1004.
 Helmholtz 450, 451, 452, 455, 564, 736, 740, 779.
 Hemsalech 625, 985.
 Henri (V.) 397, 663.
 Henry 179.
 Hermitte 186.
 Heroult 1093.
 Herschell 374, 1072.
 Hertz 986, 987, 988.
 Hess 269.
 Himstedt 963.
 Hirn 363, 364, 375.
 Hittorf 735, 961.
 Hoffmann 616.
 Holtz 921.
 Hope 254.
 Hospitalier 857.
 Howles 1009.
 Hughes 1022, 1037.
 Hull 634.
 Humboldt (de) 1074.
 Hurmuzescu 970, 973.
 Hutchinson 963.
 Huygens 116, 506, 582, 681.
- I**
- Ives 648.
- J**
- Jablochhoff 1005.
 Jacobi 991.
 Jäderin 22.
 Jamin 828, 831, 1002, 1004, 1005, 1007.
 Janet 1029.
 Janssen 634, 646.
 Japy 1004.
 Jarry 313, 330.
 Jaubert 1074.
 Javal 559, 561.
 Jean 525.
 Jeance 1042.
 Jeantaud 1015.
 Jobert 186.
 Jobin 689.
 Joubert 1002, 1060.
 Joule 363, 365, 367, 762.
 Jurin 214.

K
 Kaemtz 1051.
 Kamerlingh - Onnes 310.
 Kater 111.
 Kaufmann 978.
 Kayser 627.
 Keller 1008.
 Kelvin (lord) 280.
 365, 480, 706, 760,
 809, 921, 946, 950,
 1025, 1026, 1060.
 Kepler 87.
 Kerr 944.
 Kirchhoff 624, 632,
 887.
 Koenig 400, 422, 433,
 447, 450.
 Kohlrausch 274, 785.
 Korn 1024.
 Krebs 185, 356.
 Krieger 1015.
 Kundt 436.
 Kurlbaum 619.

L
 Laborde 976, 979,
 983.
 Lamarck 1081.
 Lamotte 990.
 Langevin 973.
 Langley 241.
 Laplace 163, 218,
 274, 374, 792, 796,
 1081.
 La Provostaye 283.
 Larmor 965.
 Laudénbach 404.
 Laurent 689.
 Laussedat 1068.
 Lavoisier 269, 1081.
 Lebedéw 634, 814,
 988.
 Le Chatelier 212, 329,
 331, 584.
 Lecher 989.
 Leclanché 752.
 Lecoq de Boisbau-
 dran 616, 624, 625.
 Leduc 166, 217, 261.
 Lehmann 329.
 Lemoine 944.
 Lénard 627, 966.
 Lenz 832.
 Leroy 248, 341.
 Leslie 342.
 Leverrier 1081.
 Lilienthal 187.
 Limb 948.
 Linde 310, 313.
 Lippmann 118, 222,
 339, 482, 658, 659,
 660, 665, 816, 849,
 888, 948, 950.
 Lockyer 624.
 Lodge 1027.
 Löwy 594.
 Lorentz 849, 965.
 Lumière (A. y L.)
 397, 650, 661.

Lummer 619.
 Lyon 425.

M
 Mac Clung 973.
 Mac Dougal 1009.
 Macé de Lépinay 56,
 516, 658.
 Mackenstein, 660.
 Mac Leod 197.
 Magnus 259, 760.
 Mairan (de) 105.
 Maneuvrier 274, 785,
 864, 1002, 1004,
 1007.
 Mangon 1054.
 Marage 421, 425, 452,
 453, 454, 455.
 Marck 159.
 Marconi 1027, 1028,
 1031.
 Marey 395, 646.
 Marié-Davy 1081.
 Mariotte 171, 224,
 570.
 Martens 584.
 Marx 972.
 Mascart 703, 946,
 1060.
 Maskelyne 89.
 Masson 274, 439, 875.
 Mathias 252, 324, 326,
 327, 708.
 Matout 975.
 Maury 1078, 1081.
 Maxwell 634, 832,
 938, 943, 988.
 Mayer 360, 374, 375.
 Mekarski 198, 202.
 Melloni 241, 628.
 Melsens 1067.
 Mercadier 1035.
 Mergat 290.
 Mersenne 445.
 Meyer 302.
 Meyer (S.) 981.
 Michelson 8, 460,
 671.
 Miculescu, 363.
 Mildé 1015.
 Millochau 635.
 Minet 1008.
 Miquel 663.
 Mitschorlich 217.
 Mohn 114.
 Mohr 146.
 Moissan 1088.
 Moitessier 656.
 Monge 516.
 Montgolfier 183.
 Moore 1007.
 Morin 71.
 Morse 1020.
 Morsen 961.
 Moscicki 1029.
 Moureaux 708.
 Moureu 983.
 Moutier 1046.
 Mouton 585, 944.
 Murray 991.
 Mussy 658.

N
 Nachet 580, 581, 582,
 584.
 Nansen 114.
 Natterer 174, 307,
 323.
 Négrier (de) 1088.
 Nénot 115.
 Nernst 778, 1001.
 Neumann 839.
 Newcomb 460.
 Newton 68, 88, 496,
 524, 598, 601, 641,
 642, 669.
 Neyt 656.
 Nichols 634.
 Niepco 643.
 Nobili 241.
 Nodon 864.
 Nogier 663.
 Nordmann 1068.

O
 Ohm 764, 767, 773.
 Olszewski 309.
 (Erstedt) 225, 226, 787.
 Osmond 584.
 Ostwald 329.
 Otto 1010.
 Oudin 1046.

P
 Paalzow 985.
 Papin 291.
 Pariett 159.
 Parsons 354.
 Pascal 124, 126, 129,
 155.
 Paschen 961.
 Pasteur 216.
 Pathé 404.
 Pellat 325, 421, 778,
 816.
 Peltier 760, 1051,
 1060.
 Pender 963.
 Percin 1020.
 Périer 155.
 Périgaud 471.
 Perkins 225.
 Pérot 303, 516.
 Perrin 3, 331, 779,
 962, 973.
 Perrotin 460.
 Petit 250, 271.
 Pfeffer 339.
 Pickard 1031.
 Pictet 313.
 Pierson 356.
 Planté 745.
 Plateau 216, 397.
 Plücker 624, 961.
 Plumandon 1058,
 1065, 1088.
 Poggendorff 480.
 Poincaré (H.) 990.
 Poincaré (L.) 765.
 Poisson 706.
 Poitevin 655.

Pollak 864.
 Poncelet 26.
 Ponsot 336, 339.
 Porret 779.
 Porro 597.
 Pouillet 815, 1072.
 Poulsen 1042.
 Poynting 329.
 Pringsheim 619.
 Prony 359.
 Pulfrich 524.
 Purkinje 561.

Q
 Quet 214.
 Quidor 582.
 Quincke 214, 779, 944.

R
 Ramsay 313, 624,
 980, 981.
 Ramsden 582, 589,
 925.
 Raoult 336, 337.
 Rayleigh (Lord) 2,
 411, 567, 676, 877,
 1009.
 Reaumur 233.
 Regnault 165, 166,
 174, 198, 225, 250,
 255, 259, 260, 261,
 262, 271, 273, 274,
 286, 287, 293, 297,
 326, 341, 342, 435,
 468.
 Reich 68, 621.
 Reimann 146.
 Renard 185, 186.
 Renou 1073.
 Richard 162, 170,
 240, 242, 344, 574,
 1054.
 Richter 624.
 Riecke 965.
 Righi 988.
 Roberval 54.
 Rømer 460.
 Roger 1002.
 Rollmann 658.
 Röntgen 274, 967.
 Rothé 16, 744.
 Rowland 616, 633,
 675, 963.
 Rubens 614, 988.
 Rubberg 259.
 Ruhmer 1024, 1042.
 Ruhmkorff 875.
 Rumford 269, 360,
 464, 606.
 Runge 627.
 Rutherford 973,
 974, 978, 980, 984,
 1031.

S
 Sabine 425.
 Sacerdote 217.
 Sagnac 971.

Sajotchewski 327.	Sturm 225, 438.	Tyndall 281, 676.	Wells 1056.
Santos-Dumont 187.	Symmance 466.		Welter 274.
Sarazin 989, 990.	Swanberg 241.		Wertheim 28, 439.
Sarrau 318.	Swingedauw 990.	V	Westinghouse 202.
Saussure (de) 343, 1052, 1058, 1072.	Szigmondy 585.		Weston 755.
Sauveur 415, 434.		Valenta 625.	Westphal 146.
Savart 433, 439.	T	Van der Mensbrug- ghe 214, 216.	Wheatstone 658, 783, 985, 1023, 1062.
Schietz 561.		Van der Waals 318, 327.	Wickam 975.
Schmidt 944, 974, 1062.	Tammann 280, 329, 337.	Van't Hoff 339.	Wiedemann 378.
Schuster 625, 985.	Taylor 443.	Vasilesco Karp en 963.	Wien 620..
Schultz 961.	Teisserenc de Bort 187.	Vauthier 435.	Wiener 665.
Schumann 614.	Tesla 986.	Végard 1068.	Wilhelmy 214.
Schweidler (Von) 978, 984.	Thiesen 52, 159.	Verneuil 195.	Wilke 1068.
Sée 163.	Thilorier 252.	Vidie 161.	Wilson 973.
Sellon 745.	Thirion 208.	Villard 313, 330, 951, 968, 978, 1068.	Wimshurst 923.
Serpollet 346.	Thompson (S.-P.) 824.	Vincent 217.	Windhausen 313.
Seyewetz 650.	Thomson (J.) 230.	Violle 242, 270, 435, 468, 1002, 1072, 1088.	Wæstyn 271.
Shelford 1024.	Thomson (J.-J.) 963, 965, 973.	Vlès 397.	Wollekmar 745.
Siedentopf 585.	Thomson (W.) (ver Lord Kelvin).	Voisin 187.	Wolf 214.
Siemens 856, 1010.	Tissandier 185.	Volta 720, 778, 920.	Wollaston 577, 633.
Silbermann 269, 326.	Tissot 990, 1029, 1031.		Wood 614, 628, 988.
Simon 881.	Torricelli 154, 223.	W	Wright 187.
Six 239.	Touplain 83.		Wroblewski 309.
Smellen 565.	Townsend 973.	Walsh 961.	Wülner 337.
Smith 706.	Traube 339.	Walther 1062.	
Soddy 980, 981, 984.	Travers 310, 313.	Watt 285, 348, 349, 358.	Y
Sondhaus 429.	Tresca 8.	Watteville (de) 574, 625.	Young (S.) 327.
Sorby 584.	Triger 203.	Wedding 584.	
Sorel 1081.	Trouvelot 1062.	Wehnelt 881.	Z
Sprengel 195.	Troxler 570.	Weiss 1043.	Zeiss 644.
Stéfan 619.	Tscherning 559, 561, 562.		Zeleny 973.
Stephenson 351.			Zoelly 354.
Stévin 136.			
Stokes 639, 640.			
Stoletow 325.			
Strutt 983.			

ÍNDICE

LIBRO I

MATERIA, MOVIMIENTO Y FUERZAS

CAP. I. — <i>Nociones preliminares.</i> —		
<i>Propiedades generales de la materia.</i>		
— <i>Medida de longitudes.</i>	1	
Estados físicos de los cuerpos.	1	
Divisibilidad de la materia	2	
Átomos y moléculas.	3	
Fenómenos. — Física y química.	3	
Magnitudes	3	
Leyes físicas. — Objeto de la Física.	3	
Medida de magnitudes. — Unidades.	4	
Metro y centímetro	4	
Unidades fundamentales y unidades derivadas. — Medida de superficies y volúmenes.	5	
Sistemas de medidas racionales. — Sistema C.G.S.	5	
Errores de las medidas. — Error absoluto, error relativo. — Exactitud de una medida	6	
<i>Medida de longitudes</i>	6	
Reglas graduadas.	6	
Nonio o vernier	6	
Cartabón de corredera.	7	
Tornillo micrométrico.	8	
Esferómetro.	8	
Compás de tornillo de Palmer.	9	
Máquina de dividir	10	
Micrómetro ocular.	11	
Catetómetro	11	
Comparador.	13	
Medidas geodésicas	14	
CAP. II. — <i>Fuerzas.</i> — <i>Máquinas simples</i>	15	
Fuerzas. — Elementos de una fuerza.	15	
Efectos de las fuerzas. — Equilibrio.	16	
Deformaciones producidas por las fuerzas. — Acción y reacción.	16	
Medida estática de las fuerzas. — Dinamómetros.	16	
Representación de las fuerzas. — Vectores	18	
Deformación de los cuerpos sólidos. —		
Elasticidad	18	
Presión	19	
Resultante y componentes.	20	
Composición y descomposición de las fuerzas concurrentes.	20	
Composición y descomposición de las fuerzas paralelas	21	
Máquinas. — Palanca.	22	
Polea fija	23	
Torno	23	
Plano inclinado	24	
Máquinas compuestas.	24	
CAP. III. — <i>Gravedad.</i> — <i>Centro de gravedad.</i> — <i>Equilibrio de los cuerpos graves.</i>	25	
Definición de la gravedad	25	
Dirección de la gravedad. — Plomada	25	
Vertical. — Horizontal.	26	
Intensidad del peso de un cuerpo.	28	
Centro de gravedad de los cuerpos homogéneos.	28	
Equilibrio de graves suspendidos	29	
Equilibrio de sólidos que descansan en un plano horizontal.	30	
Determinación empírica del centro de gravedad de los cuerpos sólidos.	32	
CAP. IV. — <i>Medidas de pesos y masas.</i> — <i>Balanza.</i> — <i>Definición de densidades y pesos específicos</i>	33	
Balanzas	33	
Teoría de la balanza.	34	
Exactitud de la balanza. — Simple pesada.	35	
Doble pesada. — Tara	36	
Condiciones de sensibilidad	36	
Demostración algebraica	37	
Balanzas de precisión	38	
Balanzas de precisión con amortizador	41	

Balanza de Roberval.	41	geométrica. — Aplicación al movimiento circular uniforme. — Fuerza centripeta.	61
Balanza romana.	42	Fuerza centrífuga.	61
Definición estática de la masa de un cuerpo. — Gramo	42	Principio de la independencia de la acción de una fuerza y del movimiento antes adquirido	66
Relación entre el peso y la masa de un cuerpo. — Intensidad de la gravedad.	43	Movimiento de los proyectiles.	66
<i>Densidades y pesos específicos</i>	44	Problema del tiro.	68
Densidad de un cuerpo. — Masa específica. — Volumen específico. — Peso específico	44	Atracción o gravitación universal. — Hipótesis o ley de Newton.	68
CAP. V. — <i>Movimientos. — Cinemática</i>	45	Comparación de la gravedad a la atracción newtoniana	69
Definiciones	45	Estudio experimental de la atracción universal	70
Movimiento uniforme. — Velocidad. — Unidad de velocidad	46	CAP. VII. — <i>Trabajo de las fuerzas. — Energía</i>	71
Movimiento variado rectilíneo.	46	Trabajo de una fuerza.	71
Movimiento rectilíneo uniformemente variado. — Aceleración. — Unidad de aceleración.	47	Unidades de trabajo.	73
Aceleración de un movimiento variado rectilíneo cualquiera.	48	Potencia de una máquina. — Vatio. — Caballo de vapor. — Horse-power.	74
Movimiento curvilíneo.	48	Trabajo de las máquinas. — Conservación del trabajo.	74
Movimiento circular uniforme.	49	Resistencias pasivas. — Frotamientos. Rendimiento de una máquina	75
Movimiento de un cuerpo sólido. — Movimiento de traslación. — Movimiento de rotación.	50	<i>Energía. — Conservación de la energía.</i>	76
CAP. VI. — <i>Dinámica. — Caída de los cuerpos. — Gravitación universal.</i>	50	Fuerza viva. — Teorema de las fuerzas vivas	76
Dinámica. — Principio de la inercia. Caída de los cuerpos. — Estudio experimental.	51	Energía cinética o actual	78
Leyes numéricas de la caída en el vacío. — Naturaleza del movimiento.	52	Martillo.	78
Expresión de las leyes de la caída de los cuerpos	53	Variaciones de la velocidad de una máquina. — Volantes	79
Comprobación experimental de las leyes numéricas. — Aparato del general Morin.	53	Energía potencial	80
Máquina de Atwood.	55	Transformaciones mutuas de la energía cinética y de la energía potencial. Otras formas de energía. — Principio de la conservación de la energía.	81
Plano inclinado.	57	CAP. VIII. — <i>Péndulo. — Medida de la intensidad de la gravedad. — Medida del tiempo.</i>	83
Movimiento uniforme que sucede a un movimiento variado cuando se suprime la fuerza.	57	Péndulo. — Movimiento oscilatorio. Leyes de las oscilaciones de un péndulo cualquiera	84
Movimiento que adquiere un cuerpo por la influencia de una fuerza constante en dirección y magnitud. Proporcionalidad de las fuerzas a las aceleraciones	58	Medida de la duración de oscilación de un péndulo. — Método de las coincidencias	85
Definición dinámica de la masa	59	Leyes del péndulo simple	86
Unidades de masa y fuerza. — Dinámica. Relación entre la aceleración en la máquina de Atwood y la aceleración de la caída libre	61	Teoría del péndulo simple. — Movimiento pendular. — Fórmula del péndulo	87
Resistencia de los fluidos al movimiento. — Caída de los cuerpos en el aire.	61	Comparación de la fórmula del péndulo y los experimentos	89
Aplicaciones de la resistencia del aire.	63	Péndulo compuesto. — Péndulo simple sincrónico. — Péndulo reversible	89
La relación $F = m\gamma$ es una ecuación		Teoría del péndulo compuesto	90
		<i>Medida de g.</i>	91
		Aplicación del péndulo al cálculo de g . Causas de las variaciones de g	93

Variaciones de g en lo interior del globo.	94	Balancín de resorte espiral. — Relo-	
Medida de g en el mar.	94	jes de bolsillo. — Cronómetros y	
Péndulo de Foucault.	94	cronógrafos	96
Medida del tiempo. — Péndulo regu-		Fomento eléctrico de las oscilaciones	
lador de Huygens.	95	del péndulo. — Péndulo Lippmann.	97

LIBRO II

HIDROSTÁTICA

CAP. I. — <i>Caracteres generales de los líquidos</i>	99	Nivel de burbuja de aire	113
Definiciones.	99	Aguas corrientes. — Distribución del	
Fuerzas que los líquidos ejercen en las		agua en las ciudades. — Saltos de	
paredes de los recipientes que los		agua. — Pozos. — Manantiales. —	
contienen	99	Pozos artesianos.	114
Fuerzas ejercidas en una superficie		<i>Principio de Arquímedes. — Cuerpos</i>	
sumergida en un líquido.	100	<i>flotantes</i>	116
Fuerzas ejercidas por un líquido.	100	Principio de Arquímedes	116
Principio fundamental de la hidros-		Recíproca del principio de Arquí-	
tática	101	medes.	117
Transmisión de presiones por los		Determinación del volumen de un	
líquidos. — Principio de Pascal	103	cuerpo	117
Influencia de la presión atmosférica		Equilibrio de los cuerpos sumergidos	
en las fuerzas ejercidas por un lí-		y de los cuerpos flotantes.	117
quido	104	Condiciones de equilibrio de los cuer-	
Expresión de la fuerza ejercida por		pos flotantes	118
un líquido sobre una porción de		Meta-centro. — Equilibrio de los na-	
pared	104	víos.	119
Fuerzas que ejerce un líquido sobre		Buques submarinos	120
una pared plana lateral.	105		
Teorema.	105	CAP. II. — <i>Medidas de las densidades</i>	
Fuerzas ejercidas sobre el conjunto		<i>de sólidos y líquidos. — Areómetros.</i>	121
de las paredes de un vaso. — Teo-		Medida de la densidad de los cuerpos.	121
rema	106	Densidad de los sólidos	121
Prensa hidráulica.	107	Densidades de los líquidos.	122
Aplicaciones del agua bajo presión.	109	Aplicación del principio de Arquí-	
Superficie libre de un líquido. — Lí-		medes a las medidas de densidades.	
quidos y fluidos superpuestos. —		— Balanza de Mohr.	123
Superficies de nivel.	110	Areómetros. — Densímetros.	124
Vasos comunicantes.	111	Areómetros de graduación arbitraria.	
<i>Aplicaciones diversas.</i>	112	— Areómetros Baumé.	125
Nivel de agua.	112	Alcoholímetro centesimal de Gay-	
		Lussac	125

LIBRO III

NEUMÁTICA

CAP. I. — <i>Presión atmosférica. — Ba-</i>		Valor de la presión atmosférica. —	
<i>rómetros. — Manómetros</i>	129	Atmósfera.	133
Peso de los gases.	129	Barómetros	133
Presión de los gases. — Presión		Construcción del barómetro	134
atmosférica	129	Diversas formas de barómetros. —	
Diferencia de las presiones en dos		Medida de la altura barométrica.	134
puntos de una masa gaseosa.	130	Barómetros transportables.	135
Expansibilidad de los gases. — Fuerza		Variaciones de la presión atmosférica	
elástica	131	en un mismo lugar. — Barómetros	
Medida de la presión atmosférica. —		metálicos o aneroides	136
Experimento de Torricelli	131	Barómetro registrador de Richard.	137
Comprobación de Pascal.	132	Nivelación barométrica. — Altura de	
		la atmósfera.	138

<i>Medida de la presión de un gas. — Manómetros</i>	139	el aire. — Aeroplanos. — Cometas.	159
Empleo del barómetro. — Manómetro de aire libre.	139	Globos tripulados y globos no tripulados. — Sondas aéreas de Renard.	159
Manómetro de Regnault.	140	CAP. IV. — <i>Bombas para gases y para líquidos</i>	162
Manómetro barométrico o barómetro diferencial de Regnault.	140	<i>Máquina neumática</i>	162
Gran manómetro de aire libre de Cailletet.	141	Principio de las máquinas neumáticas	162
Manómetro llamado de Desgoffes . .	142	Bomba de mano. — Máquinas neumáticas industriales. — Bomba de vacío de Burckhardt.	163
Manómetros metálicos. — Manómetro de Bourdon	143	Bomba neumática E. Carré	164
Manómetros registradores.	144	Bombas de vacío de Geryk	164
CAP. II. — <i>Compresibilidad de los gases. — Ley de Mariotte. — Mezcla de los gases. — Difusión de los gases. — Disolución de los gases en los líquidos</i>	144	Máquinas neumáticas de mercurio. .	166
Ley de Mariotte.	144	Bombas de vacío rotatorias	168
Variación de la densidad de un gas con su presión.	145	Trompas de agua	168
Estudio experimental	145	Trompas de mercurio.	169
Estudio crítico de la ley de Mariotte.	147	Producción del vacío por medio del carbón vegetal sometido a la temperatura del aire líquido	170
Experimentos de Amagat	148	Medida de la presión residuo en un recipiente en que se ha enrarecido el aire. — Barómetro truncado. — Aparato de Mac-Leod.	170
Compresibilidad a diversas temperaturas	150	<i>Aparatos para la compresión de los gases</i>	171
Mezcla de los gases o difusión. . . .	150	Bombas de compresión	171
Difusión de los gases a través de las paredes porosas y de los pequeños orificios. — Ley de Graham	152	Trompas insufiantes.	172
Disolución de los gases por los líquidos	152	<i>Aplicaciones de los gases comprimidos y enrarecidos</i>	173
CAP. III. — <i>Principio de Arquímedes aplicado a los gases. — Globos aerostáticos</i>	153	Producción de los gases comprimidos en la industria	173
Aplicación del principio de Arquímedes a los gases.	153	Depósitos de gases comprimidos. — Reguladores de presión.	173
Peso real y peso aparente. — Corrección de las pesadas efectuadas en el aire.	154	Diversas aplicaciones del aire comprimido y enrarecido	174
Equilibrio de los cuerpos sumergidos en la atmósfera.	154	Trabajos submarinos	176
Aerostatos : montgolfieras y globos .	155	<i>Bombas para líquidos</i>	178
Teoría de los aerostatos. — Fuerza ascensional	156	Definiciones.	178
Navegación aérea o dirección de los globos. Globos dirigibles.	157	Bombas aspirantes.	178
Aparatos aviadores más pesados que		Esfuerzo y trabajo necesarios para manejar la bomba aspirante. . . .	179
		Bombas aspirantes e impelentes. . .	180
		Bombas de salida continua	181
		Bombas de incendios	182
		Bombas rotativas	183
		Sifones	183
		Pipeta.	184

LIBRO IV

NOCIONES DE CAPILARIDAD. — NOCIONES DE HIDRODINÁMICA.
COMPRESIBILIDAD DE LOS LÍQUIDOS

CAP. I. — <i>Nociones de capilaridad. — Fuerzas moleculares.</i>	185	los tubos capilares. — Ley de Jurin.	186
Fenómenos capilares	185	Contacto de los líquidos y de los sólidos no mojados. — Ángulo de conjunción. — Ley de las depresiones capilares	187
Leyes de la ascensión de los líquidos en			

Descenso del punto de congelación del un disolvente por la presencia del cuerpo disuelto. — Crioscopia	285	Equivalente mecánico de la caloría	318
Influencia de una sustancia disuelta bajo la presión máxima del vapor de un disolvente. — Tonometría.	288	Métodos directos. — Experimento de Joule	318
Influencia de una sustancia disuelta a la temperatura de ebullición de un disolvente. — Ebulloscopia.	288	Transformación inversa del calor en trabajo. — Experimentos de Hirn.	320
Difusión de los líquidos. — Osmosis	289	Métodos indirectos	320
— Presión osmótica.	289	Energía calorífica.	322
CAP. XII. — <i>Higrómetros</i>	291	Energía interna de una masa de gas.	323
Definiciones.	291	Ley de Joule	323
Higrómetros de condensación. — Higrómetro Alluard	291	Variación de la temperatura de una masa de gas por compresión o expansión adiabáticas.	323
Psicrómetro.	292	Principio de Carnot. — Rendimiento de las máquinas térmicas. — Ciclo de Carnot.	324
Higrómetro de cabello.	293	Teorema de Carnot	326
Higrómetro registrador.	294	Rendimiento de las máquinas reales.	327
Fórmulas relativas a los higrómetros.	294	Degradación de la energía.	328
CAP. XIII. — <i>Máquinas térmicas</i>	295	Manantial de la energía terrestre.	328
Máquinas de vapor. — Principio. — Generadores de vapor.	295	Origen de la energía solar.	329
Máquina de vapor propiamente dicha.	297	Trabajo muscular y calor animal	329
Condensador.	300	CAP. XV. — <i>Conductibilidad calorífica de los sólidos, de los líquidos y de los gases</i>	330
Expansión del vapor	301	Propagación del calor por conductibilidad. — Conductibilidad de los sólidos	330
Máquinas de expansión múltiple.	301	Leyes de la conductibilidad. — Teoría de Fourier.	331
Órganos accesorios	302	Estudio experimental	332
Perfeccionamientos en el mecanismo de las máquinas de simple expansión.	303	Conductibilidad de los líquidos	332
Máquinas locomotoras.	305	Conductibilidad de los gases.	333
Turbinas de vapor.	306	Aplicaciones de la conductibilidad y de la mala conductibilidad de los cuerpos. — Aislamiento térmico.	333
Motores de explosión	308	CAP. XVI. — <i>Aplicaciones, calefacción y ventilación</i>	334
Funcionamiento de los motores de explosión	309	Chimeneas.	334
<i>Medida del trabajo en las máquinas térmicas</i>	313	Estufas	335
Evaluación del trabajo del fluido motor en una máquina térmica.	313	Caloríferos y ventiladores. — Generalidades	336
Indicadores. — Ciclos de las máquinas de vapor y de los motores de explosión.	314	Calefacción por el aire caliente. — Caloríferos de aire.	336
Medida de la potencia utilizable. — Freno de Prony	316	Calefacción por agua caliente. — Caloríferos de agua	336
CAP. XIV. — <i>Nociones elementales de termodinámica</i>	317	Calefacción por el vapor. — Caloríferos de vapor	337
Calor desprendido o absorbido por las acciones mecánicas	317	Ariete termohidráulico de Bunau-Va- rilla.	337
Principio de la equivalencia del calor y del trabajo	318		

LIBRO VI

MOVIMIENTOS VIBRATORIOS. — ACÚSTICA

CAP. I. — <i>Propiedades de los movimientos vibratorios</i>	339	Método gráfico. — Cronógrafo registrador.	340
Movimiento oscilatorio de una lámina metálica. — Diapasón.	339	Naturaleza del movimiento vibratorio de una lámina o de un diapasón	341

Ecuación del movimiento vibratorio.		
— Fase	341	
Energía vibratoria	343	
Movimientos vibratorios compuestos.	344	
Aplicaciones generales del método gráfico	345	
Cronofotografía	346	
Síntesis del movimiento. — Cinematógrafos	347	
Método ostraboscópico	349	
 <i>CAP. II. — Producción y cualidades de los sonidos</i>		
Objeto de la acústica. — Sonidos y ruidos	350	
Movimiento vibratorio de los cuerpos sonoros	350	
Causa de la intensidad de un sonido.	351	
Causa de la altura de un sonido. . .	351	
Causa del timbre	352	
Reproducción de los sonidos. — Fonógrafos	352	
Asociación del cinematógrafo y del fonógrafo	354	
 <i>CAP. III. — Medida de la altura de los sonidos. — Intervalos musicales.</i>		
Medida de la altura de un sonido . .	355	
Clasificación de los sonidos. — Intervalos musicales	358	
Acordes	358	
Armónicos	359	
Escala musical. — Gama	359	
Gama natural. — Sostenidos y bemoles	360	
Gamas menores. — Tonos relativos. .	361	
Gama temperada. — Temperamento.	362	
Diapasón	362	
Notación de las diversas gamas naturales. — Números absolutos de vibraciones	362	
 <i>CAP. IV. — Propagación de las vibraciones</i>		
Propagación del sonido	363	
Propagación de las vibraciones. — Vibraciones transversales.	364	
Propagación de las vibraciones longitudinales	366	
Propagación de las vibraciones en una atmósfera ilimitada	368	
Mecanismo de la propagación de las ondas en un medio indefinido . . .	368	
Intensidad de un sonido, que se propaga en el aire. — Límite de intensidad de los sonidos perceptibles .	369	
Conservación de la intensidad del sonido durante la propagación en un tubo.	370	
Influencia de los movimientos de una procedencia sonora y del observador sobre la altura del sonido percibido.	371	
 <i>CAP. V. — Reflexión, refracción e interferencias de los movimientos vibratorios.</i>		
Reflexión del sonido. — Ecos y resonancias	373	
Acústica de las salas	374	
Mecanismo de la reflexión de las ondas	375	
Reflexión de las ondas que se propagan en un medio indefinido. — Leyes.	376	
Demostración de las leyes de la reflexión	378	
Refracción de las ondas.	378	
Demostración de las leyes de la refracción.	380	
<i>Interferencias de los movimientos vibratorios</i>	381	
Fenómenos de interferencias. — Principio de la superposición de los pequeños movimientos.	381	
Interferencias de los movimientos directo y reflejado que se propagan por una cuerda	381	
Interferencias de los movimientos vibratorios longitudinales.	381	
Interferencias de dos movimientos vibratorios de períodos diferentes. — Pulsaciones.	385	
 <i>CAP. VI. — Velocidad del sonido</i>		
Medida de la velocidad del sonido en el aire	386	
Velocidad del sonido en los gases distintos del aire.	387	
Leyes de la velocidad del sonido en los gases	388	
Velocidad del sonido en los líquidos.	389	
Velocidad del sonido en los sólidos. .	389	
 <i>CAP. VII. — Cuerdas y tubos sonoros.</i>		
Cuerdas sonoras.	390	
Cuerdas vibrantes. Sonómetro. . . .	390	
Leyes de las vibraciones transversales.	391	
Armónicos.	392	
Fórmulas de la cuerdas vibrantes . .	393	
Tubos sonoros	394	
Definiciones.	394	
Leyes experimentales de los tubos sonoros	395	
Fórmulas de los tubos sonoros. . . .	396	
Investigación de los nodos y vientres.	398	
Influencia de la naturaleza del gas vibrante.	399	
 <i>CAP. VIII. — Fenómenos de resonancia. — Análisis y síntesis de los sonidos. — Timbre. — Percepción de los sonidos</i>		
Fenómenos de resonancia. — Refuerzo.	400	

Análisis de los sonidos	401	<i>Percepción de los sonidos</i>	405
Resultados generales de Helmholtz.	403	Descripción del oído	405
Sonidos de la voz humana. — Vocales.	413	Mecanismo de la audición.	407
		Teorías de la audición	407

LIBRO VII

ÓPTICA

CAP. I. — Propagación de la luz.		Focos secundarios. — Imagen de un	
Definiciones	409	objeto alejado.	431
Ley de la propagación rectilínea. —		Imágenes de un punto y de un objeto	
Óptica geométrica.	409	luminoso. — Estudio experimental	
Teoría geométrica de las sombras. . .	410	y geométrico. — Caso de las imá-	
Imágenes suministradas por las peque-		genes reales	432
ñas aberturas	412	Planos conjugados	433
Velocidad de la luz	412	Imagen real de un objeto rectilíneo	
		perpendicular al eje principal. . .	434
CAP. II. — Intensidad de la luz — Fo-		Objetos situados más acá del plano	
<i>tometría.</i>	414	focal. — Imágenes virtuales. . . .	435
Definiciones.	414	Determinación de la distancia focal	
Leyes de la iluminación.	415	de un espejo cóncavo.	436
Comparación de las intensidades de		Teoría de los espejos cóncavos. —	
dos focos luminosos. — Medidas fo-		Caso de las imágenes reales. . . .	437
tométricas.	417	Magnitud de la imagen real	437
Fotómetro de Rumford	418	Caso de las imágenes virtuales. —	
Fotómetro de Bunsen	418	Relación entre las distancias del	
Fotómetros perfeccionados	419	objeto y de la imagen al espejo. .	438
Focos extensos. — Brillo intrínseco .	420	Magnitud de la imagen virtual . . .	438
Tipos de luz.	420	Fórmula de Newton.	439
Estudios de diversos focos	421	Espejos convexos. — Estudio geomé-	
		trico y experimental (caso de los	
CAP. III. — Reflexión de la luz. —		rayos centrales).	
<i>Espejos planos.</i>	422	Teoría de los espejos convexos . . .	440
Difusión y reflexión regular. Espejos.	422	Medida de la distancia focal de un	
Leyes de la reflexión	422	espejo convexo	440
Formación de las imágenes en los		Fórmulas generales de los espejos	
espejos planos.	423	esféricos	440
Demostración de las leyes.	424	Espejos de gran abertura. — Aberra-	
Imagen de un objeto luminoso en un		ción de esfericidad. — Cústica por	
espejo plano.	425	reflexión	441
Campo de un espejo plano.	425	Espejos aplanéticos.	441
Espejos inclinados. — Imágenes múl-			
tiples	426	CAP. V. — Refracción de la luz. —	
Espejos paralelos. — Imágenes múl-		<i>Prisma</i>	
tiples	426	<i>Leyes de la refracción simple</i>	
Espejos estañados.	427	Definiciones.	
Problema del espejo giratorio.	427	Leyes de la refracción simple. . . .	
Determinación de los pequeños ángu-		Índice de refracción.	
los de rotación. — Métodos de Kel-		Construcción del rayo refractado —	
vin y de Poggendorf.	428	Regla de Huyghens.	
Registro fotográfico de los pequeños		Desviación por refracción.	
movimientos de rotación	429	Principio del regreso inverso de la	
Celóstato Lippmann.	429	luz. — Índice inverso.	
CAP. IV. — Espejos esféricos		Lámina de caras paralelas.	
Definiciones.	430	Índice absoluto. — Índice relativo. .	
Espejos cóncavos. — Estudio geomé-		Refracción atmosférica.	
trico y experimental (caso de los		Variación del ángulo de refracción en	
rayos centrales).	430	función del ángulo de incidencia.	
Foco principal.	430	— Paso de la luz de un medio a	
		otro más refringente.	

Paso de la luz de un medio a otro menos refringente.	448	Determinación de la distancia focal de una lente divergente.	472
Ángulo límite, reflexión total	448	Lentes gruesas	472
Visión a través de una superficie plana refringente	449	Sistemas dióptricos centrados	473
Visión a través de una lámina de ca- ras paralelas	450	Defectos de las lentes	473
Espejismo.	451	Empleo de las lentes convergentes en los proyectores. — Lentes de esca- lonos	474
<i>Prisma</i>	452	Faros	474
Definiciones. — Refracción de un rayo luminoso por un prisma.	452	Fabricación de las superficies planas y esféricas	475
Fórmula del prisma.	453	CAP. VII. — <i>El ojo humano. — Vi- sión.</i>	476
Estudio experimental de la desviación.	453	Estructura del ojo humano	476
Estudio teórico de la desviación. . . .	455	Mecanismo de la visión	478
Condición de emergencia en los pris- mas.	455	Línea visual. — Campo de visión neta. — Diámetro aparente de un objeto.	478
Prismas de reflexión total.	456	Acomodación	479
Imagen dada por un prisma.	456	Emetropia, miopia, hipermetropia. . .	479
Medida de los índices.	456	Presbicia.	480
Aplicaciones de la medida de los indi- ces. — Refractómetro de Amagat . .	457	Mecanismo de la acomodación. — Imá- genes de Purkinje	481
CAP. VI. — <i>Lentes esféricas.</i>	458	Aberraciones del ojo.	481
Definiciones.	458	Astigmatismo	482
Centro óptico. — Ejes secundarios. . .	459	Oftalmoscopio.	482
Estudio de las lentes convergentes infinitamente delgadas. — Focos. — Plano focal	460	Agudeza visual	483
Imagen del sol	462	Percepción de la claridad	483
Imágenes reales en las lentes conver- gentes.	462	Visión de los colores	483
Construcción y variaciones de la ima- gen de un objeto.	463	Persistencia de la impresión luminosa.	483
Imágenes virtuales	464	Imágenes secundarias.	483
Determinación de la distancia focal de una lente convergente. — Focó- metros	464	Campo visual. — Experimento de Ma- riotte. — Experimento de Troxler.	483
Convergencia. — Dioptria.	465	Visión binocular. — Sensación del relieve	484
Fórmulas de las lentes convergentes. Cálculo de la distancia focal	465	Apreciación de la distancia	484
Relación entre las distancias de un punto objeto y de su imagen al cen- tro óptico de la lente. — Caso de las imágenes reales.	466	CAP. VIII. — <i>Instrumentos de óptica. Aparatos de proyección. — Micros- copios. — Telescopios</i>	485
Caso de las imágenes virtuales	467	Aparatos de proyección. — Principio.	485
Relación entre la magnitud de la ima- gen de un objeto y la del mismo objeto.	467	Linternas de proyección	485
Discusión de las fórmulas	467	Lente o microscopio simple	489
Ecuación de Newton.	468	Cálculo de la potencia y del aumento de una lente:	490
Lentes divergentes delgadas. — Estu- dio experimental y geométrico	468	Corrección de las aberraciones. — Dobletes.	491
Focos. — Convergencia. — Planos focales	468	Microscopio compuesto	491
Construcción de la imagen de un objeto real.	469	Enfocamiento. — Visión en profun- didad.	492
Imagen de un objeto virtual en una lente divergente.	469	Descripción de un microscopio. . . .	492
Fórmulas de las lentes divergentes . .	470	Aumento y potencia. Cámara clara . .	494
Fórmulas generales de las lentes . . .	470	Objetivos y oculares empleados en los microscopios.	496
Combinaciones de lentes delgadas. — Teorema de las convergencias. . . .	470	Campo. — Diafragma. — Punto ocu- lar	496
		Aplicaciones del microscopio	497
		Ultramicroscopios.	498
		<i>Anteojos y telescopios</i>	498
		Anteojo astronómico.	498
		Enfocamiento.	500
		Aumento	500

Medida del aumento. 501
 Retículo. — Eje óptico. 501
 Campo. — Explorador 502
 Claridad de los anteojos 502
 Instrumentos meridianos y ecuato-
 riales. 504
 Ecuatorial acodillado 504
 Anteojo terrestre 505
 Anteojo de Galileo 506
 Anteojos de prismas o telescopios 508
 Telescopio de Newton 510
 Telescopio de Foucault 511

CAP. IX. — Radiaciones. 511

Dispersión. 511

Espectro solar. 511
 Teoría de Newton 512
 Rayos infra rojos y ultravioletados.
 — Radiaciones 512

Aberración de refrangibilidad. 512
 Acromatismo 513

Calor radiante. 513

Propagación del calor por irradiación.
 — Analogía con la luz. 513

Cuerpos diatérmicos y cuerpos atér-
 manos. 513

Propagación del calor radiante 514
 Intensidad del calor radiante. 514
 Reflexión y difusión del calor radiante. 514
 Refracción y dispersión del calor
 radiante. 515

Identidad del calor radiante y de las
 radiaciones del espectro. 516
 Irradiación en un recinto cerrado 516

Cuerpos negros. — Energía de las
 radiaciones. 516

Teoría ondulatoria. — Longitudes de
 onda de las radiaciones. 517

*Emisión de las radiaciones. — Espec-
 tros de emisión* 517

Estudio de las radiaciones emitidas por
 los diversos focos. — Espectros puros. 517

Espectroscopio 519

Graduación en longitudes de onda de
 la escala de un espectroscopio 521

Emisión de las radiaciones por los
 cuerpos. — Incandescencia. — Po-
 der emisivo 521

Ley de Stefan. 522

Distribución de la energía en el espec-
 tro. — Ley de Wien. 523

Aplicaciones de las leyes de la incan-
 descencia a los aparatos de alum-
 brado 523

Imperfección de los medios de alum-
 brado. — Luminiscencia. 524

Emisión de las radiaciones por los
 gases y vapores — Análisis espectral. 524

Nociones de análisis espectral 525

Perfeccionamientos introducidos en
 la producción de los espectros. 526

Espectros de diversos órdenes 527

Leyes de la distribución de las rayas
 en los espectros 528

*Acciones de los cuerpos sobre las radia-
 ciones. — Espectros de absorción* 528

Acciones de los cuerpos sobre las
 radiaciones. — Reflexión. — Difu-
 sión. — Absorción 528

Poder absorbente 530

Espectros de absorción 530

Relación entre la emisión y la absor-
 ción. 531

Inversión de las rayas de los espec-
 tros metálicos. — Ley de Kirchoff. 531

Rayas del espectro solar. 532

Origen de las rayas del espectro solar.
 — Rayas telúricas. — Constitución
 del sol 533

Temperatura del sol 533

Espectros de la luna, de los planetas
 y las estrellas 533

Aplicaciones del análisis espectral al
 estudio del movimiento de los as-
 tros. — Principio de Döpler. —
 Experimentos de Deslandres 534

Fosforescencia y fluorescencia 534

Transformación de las radiaciones
 por la materia. — Fosforescencia y
 fluorescencia 534

Fosforescencia 534

Fluorescencia. 536

*Colores de las radiaciones y de los
 cuerpos.* 537

Colores de las radiaciones. — Luz
 blanca. 537

Colores de los cuerpos. — Colores
 complementarios. 538

CAP. X. — Fotografía. — Acciones
*químicas y biológicas de las radia-
 ciones.* 539

Definición. — Cámara oscura. 539

Objetivos fotográficos y diafragmas 540

Exposición 542

Fotografía instantánea 543

Fotografía con luz artificial. 543

Placas al gelatino-bromuro de plata. 543

Revelación 544

Operaciones subsiguientes a la reve-
 lación. 545

Resultado de la revelación. — Clisé
 negativo. 545

Retocado del negativo. 545

Placas peliculares y películas. 546

Tirada de las pruebas fotográficas o
 positivas 546

Otros procedimientos fotográficos 547

Fotografía micrográfica 548

Procedimientos mecánicos. 548

Fotografía estereoscópica 550

<i>Fotografía ortocromática y fotografía de los colores</i>	552	Aplicaciones de las interferencias producidas por las láminas delgadas	565
Fotografía ortocromática	552	<i>Difracción de la luz</i>	566
Fotografía de los colores. Método de M. Lippmann	553	Fenómenos de difracción	566
Método indirecto. — Procedimiento tricromo	554	Causa de los fenómenos de difracción.	566
<i>Acciones químicas y biológicas.</i>	556	Difracción por los sistemas ópticos. — Poder separador de los aparatos de óptica	566
Acciones químicas de las radiaciones.	556	Difracción por gran número de hendiduras. — Redes	567
Acciones de las radiaciones sobre los seres vivos. — Fototerapia. — Poder bactericida de los rayos ultravioletados	558	Coronas. — Azul del cielo	568
CAP. XI. — <i>Vibraciones luminosas</i>	559	<i>Doble refracción.</i>	568
Diversas hipótesis que explican los fenómenos luminosos	559	Definiciones	568
Interferencia de la luz. — Ondas estacionarias. — Longitudes de onda de las radiaciones	559	Cristales de un eje. — Ley de Brewster	569
Frecuencia de las vibraciones luminosas	560	Rayo ordinario y rayo extraordinario.	569
Interferencia de los movimientos vibratorios que emanan de dos procedencias sincronicas	560	Doble refracción en los cristales de dos ejes. — Ley de Fresnel	570
Aplicación a los fenómenos luminosos.	561	<i>Polarización de la luz</i>	570
<i>Interferencias producidas por las láminas delgadas</i>	563	Definición experimental de la polarización	570
Coloración de las láminas delgadas. — Interferencias producidas por una lámina de aire. — Anillos de Newton	563	Polarizadores y analizadores monorrefringentes. — Nicol	571
Láminas delgadas de diversas sustancias	565	Turmalina	572
		Polarización por reflexión y por refracción simple	572
		Explicación de la polarización. — Vibraciones transversales del éter.	573
		Plano de vibración. — Polarización elíptica y polarización circular	573
		Polarización rotatoria	574
		Poder rotatorio de los líquidos. — Experimento de Biot	574
		Aplicaciones de la polarización rotatoria. — Polarímetros y sacarímetros	575

LIBRO VIII

MAGNETISMO

CAP. I. — <i>Propiedades de los imanes.</i>	579	Par terrestre	585
Imanes. — Definiciones	579	Declinación e inclinación magnéticas. — Meridiano magnético	586
Polos de los imanes	579	Aguja de declinación	587
Acciones mutuas de los polos de los imanes	580	Intensidad del campo magnético terrestre y de sus componentes	587
Leyes de las atracciones y de las repulsiones magnéticas	580	Brújula marina o compás de mar	587
Masa magnética	580	Medida de la declinación. — Brújulas de declinación	589
Imantación por influencia	581	Variaciones de la declinación	590
Campo magnético de un imán	582	Medida de la inclinación. — Brújulas de inclinación	591
Intensidad de un campo magnético. — Gaus	583	Brújula de inclinación de Brünner	592
Líneas de fuerza. — Fantasmas magnéticos	583	Variaciones de la inclinación. — Polos, ecuadores y paralelos magnéticos	593
Campo de un imán de herradura	584	Causas del magnetismo terrestre	594
Acción de un campo uniforme en un imán. — Definición exacta de los polos. — Momento magnético de un imán	584	Medida del momento magnético de un imán y de la componente horizontal del campo terrestre	594
CAP. II. — <i>Magnetismo terrestre.</i>	585		
Campo magnético terrestre	585		

LIBRO IX

CORRIENTE ELÉCTRICA

CAP. I. — <i>Fenómenos generales de la corriente eléctrica y de electrización</i>	597	Cálculo de la fuerza electromotriz de una pila.	613
<i>Corriente eléctrica.</i>	597	Fuerza electromotriz de una pila en tensión	614
Experimento fundamental.	597	<i>Polarización de los electrodos</i>	614
Diversos generadores de corriente. — Polos. Sentido de una corriente.	597	Experimento fundamental.	614
Intensidad de una corriente eléctrica. Cantidad de electricidad.	598	Fuerza electromotriz de polarización. Polarización de los electrodos por una fuerza electromotriz insuficiente para producir la electrólisis.	615
Cuerpos conductores y no conductores de la corriente eléctrica. — Aisladores. — Resistencia eléctrica. — Reóstatos.	599	<i>Acumuladores</i>	615
Interruptores y conmutadores	600	Principio de los acumuladores eléctricos	615
Pilas en tensión.	601	Disposición y teoría de los acumuladores modernos.	615
Pila de Volta	602	Acumuladores usuales.	617
<i>Fenómenos de electrización</i>	602	Capacidad y rendimiento	617
Electrización de los aisladores por el frotamiento	602	Aplicaciones de los acumuladores	618
Electrización de los conductores por frotamiento	602	Acumuladores ligeros. — Acumulador Edison	618
Acciones mutuas de los cuerpos electrizados	603	<i>Pilas impolarizables.</i>	618
Electroscopio de panes de oro.	603	Polarización del elemento de Volta	618
Electrización por pilas	604	Pilas de despolarizador líquido o sólido.	619
Electricidad en movimiento y electricidad en equilibrio. — Electrodinámica. — Electrostática.	605	Pila de Becquerel (llamada de Daniell)	621
Analogías hidráulicas. — Diferencia de potenciales	605	Elemento Callaud	621
CAP. II. — <i>Electrólisis.</i>	606	Pilas tipos	622
Caracteres generales de la electrólisis.	606	<i>Pilas termoeléctricas.</i>	622
Electrólisis de las sales	608	Corrientes termoeléctricas.	622
Experimentos cuantitativos	608	Pilas termoeléctricas	623
Definición precisa de la intensidad de una corriente. — Amperio.	608	Serie termoeléctrica. — Fenómeno de la inversión.	624
Cantidad de electricidad. — Culombio. Ley de Faraday. — Equivalentes electroquímicos	609	Leyes de las fuerzas electromotrices termoeléctricas	624
Medida electrofítica de la intensidad de una corriente.	610	Origen de las corrientes termoeléctricas. — Efecto Peltier. — Efecto Thomson	624
Teoría de la electrólisis. — Transporte de los iones.	611	CAP. IV. — <i>Calor desprendido por las corrientes. — Resistencia eléctrica.</i>	625
CAP. III. — <i>Fuerza electromotriz. — Polarización de los electrodos. Acumuladores. — Pilas impolarizables. — Pilas termoeléctricas</i>	611	Calor desprendido en los conductores de una corriente eléctrica	625
Energía producida por una corriente. Fuerza electromotriz de un generador. — Voltio.	612	Ley de Joule	626
Energía suministrada por un generador de corriente.	613	<i>Resistencia eléctrica.</i>	627
Analogías hidráulicas	613	Resistencia de un conductor. — Unidad de resistencia. — Ohmio	627
		Resistencia de un conductor cilíndrico. — Leyes de Ohm.	628
		Variación de la resistencia con la sustancia. — Resistividad	629
		Conductores industriales.	630
		CAP. V. — <i>Leyes de Ohm. — Diferencias de potenciales eléctricos.</i>	631
		Ley de Ohm relativa a un circuito.	631

Constantes de una pila. — Corriente máxima producida por una pila.	632	Intensidad del campo magnético en lo interior de un carrete ilimitado	654
Reunión de las pilas	632	<i>Acciones de los campos magnéticos sobre las corrientes</i>	654
<i>Diferencias de potenciales eléctricos.</i>	634	Acción sobre un elemento de corriente. — Ley de Laplace	654
Definición de la diferencia de potenciales entre dos conductores.	634	Movimientos de rotación continuos creados por las fuerzas electromagnéticas. — Motores eléctricos.	656
Valor numérico de una diferencia de potenciales. — Unidad de diferencia de potenciales	635	Acción del campo magnético terrestre sobre una corriente.	656
Trabajo eléctrico	636	Valor del par que sufre una corriente bajo la acción del campo terrestre.	657
Diferencia de potenciales entre dos puntos de un conductor recorrido por una corriente eléctrica. — Ley de Ohm relativa a una porción de circuito	638	Acción del campo terrestre sobre los solenoides.	658
Aplicaciones de la ley de Ohm	639	Acción de un imán sobre un solenoide.	658
Diferencia de potenciales entre los polos de un generador de corriente en circuito abierto	639	<i>Acciones de las corrientes sobre las corrientes. — Electrodinámica.</i>	658
Descenso del potencial a lo largo de una porción de circuito que comprende una fuerza electromotriz.	640	Fuerzas a que está sometida una corriente en el campo magnético de otra corriente	658
Empleo de un reóstato en derivación. — Potenciómetros	640	Atracciones y repulsiones mutuas de las corrientes paralelas.	658
Diferencia de potenciales al contacto de dos conductores	641	Acciones mutuas de los solenoides.	659
Fenómenos electrocinéticos	641	<i>Flujo magnético. — Trabajo electromagnético</i>	659
CAP. VI. — <i>Corrientes derivadas. — Medida de las resistencias y de las fuerzas electromotrices</i>	642	Flujo magnético.	659
<i>Corrientes derivadas.</i>	642	Caso de un imán. — Flujo de inducción magnética	660
Corrientes derivadas. — Leyes	642	Trabajo electromagnético.	661
Ventajas e inconvenientes de las distribuciones en derivación. — Distribuciones en serie	644	CAP. VIII. — <i>Medida de la intensidad de las corrientes. — Galvanómetros. — Amperímetros y voltímetros.</i>	662
Shunt.	645	Definiciones. — Galvanómetros de imán móvil	662
Comparación de las resistencias. — Puento de Wheatstone	646	Galvanómetro Thomson	663
Cajas de resistencias	647	Galvanómetro diferencial	664
Determinación de la resistencia de los líquidos	648	Galvanómetro balístico	664
Comparación de las fuerzas electromotrices de dos pilas	648	Shunt de los galvanómetros	664
CAP. VII. — <i>Electromagnetismo</i>	649	Contraste de un galvanómetro	664
<i>Campos magnéticos de las corrientes</i>	649	Galvanómetros de corriente móvil.	665
Acción de las corrientes sobre los imanes	649	Galvanómetros absolutos. — Brújula de tangentes	666
Campo magnético de una corriente rectilínea. — Estudio experimental.	649	Electrodinamómetros	666
Líneas de fuerza del campo.	650	<i>Amperímetros y voltímetros</i>	667
Caso de un circuito cerrado que rodea al imán. — Corriente circular	650	Amperímetros.	667
Campo magnético de un carrete. — Solenoides.	651	Voltímetros.	669
Intensidad del campo magnético de una corriente	652	Medida de la potencia y de la energía consumidas en una instalación eléctrica	670
Definición de la unidad electromagnética de intensidad de corriente	653	Vatímetros.	670
Expresión del campo magnético en el centro de una corriente circular.	653	Aparatos registradores	670
		CAP. IX. — <i>Imantación</i>	671
		Imantación del hierro dulce.	671
		Electroimanes.	672
		Imantación del hierro en un campo creciente. — Saturación.	673
		Imantación en un campo variable. — Histéresis.	673

Permeabilidad magnética. — Circuito magnético. 674

Aplicaciones de los electroimanes. . . 676

Imantación del acero templado. — Imanes permanentes 677

Otras sustancias magnéticas. — Diamagnetismo. 678

Influencia de la temperatura 679

Constitución de los imanes. — Teoría del magnetismo. 679

CAP. X. — *Inducción* 681

Corrientes inducidas, — Definiciones y leyes. 681

Inducción por el campo magnético terrestre 682

Inducción por un imán 682

Inducción por una corriente. 683

Trabajo resistente de las fuerzas electromagnéticas. 683

Expresión algebraica de la fuerza electromotriz de inducción 684

Inducción en circuito abierto. 684

Ley de Neumann. 685

Inducción por variación del flujo sin movimiento. 685

Influencia del hierro en los fenómenos de inducción. 686

Medida del flujo de inducción de la inducción magnética y del coeficiente de permeabilidad. 686

Medida de la intensidad de un campo magnético. 687

Self-inducción. 687

Corrientes de Foucault 688

CAP. XI. — *Unidades absolutas electromagnéticas. — Principios de las medidas absolutas.* 688

Unidades electromagnéticas cegesimales. 688

Diversas unidades del sistema electromagnético cegesimal. 688

Expresiones de las leyes de la corriente eléctrica. 689

Principio de las medidas absolutas. 690

CAP. XII. — *Máquinas generatrices de corriente continua. — Motores de corriente continua.* 690

Máquinas generatrices de corriente continua. 690

Trabajo necesario para mover la máquina. 693

Construcción de las dinamos de corriente continua. 694

Dinamos multipolares de corriente continua 695

Motores de corriente continua. — Transporte de la energía 697

CAP. XIII. — *Corrientes alternas* . . 700

Producción de las corrientes alternas. Alternadores 700

Magnetos de corrientes alternas. . . 703

Estudio de la corriente alterna producida por un alternador. — Oscilógrafos. 703

Gráfico de una corriente alterna. — Armónicas. 704

Intensidad eficaz. — Voltaje eficaz . 705

Ley de Ohm aplicada a las corrientes alternas. 705

Potencia consumida en un circuito . 706

Caso en que el circuito presente self-inducción 706

Efecto de un condensador. 708

Electrolisis por las corrientes alternas. — Válvulas electrolíticas. . . 709

Corrientes de varias fases. 709

Producción de corrientes de varias fases 710

Transporte de las corrientes de varias fases 710

Campos magnéticos giratorios. 711

Efectos de un campo giratorio. 712

Motores de corrientes alternas 712

CAP. XIV. — *Transformadores y carretes de inducción* 714

Transformadores 714

Transporte de energía por las corrientes alternas 715

Transformación de las corrientes continuas en corrientes alternas. — Conmutadoras. 716

Transformación de las corrientes alternas en corrientes continuas. . . 717

Carretes de inducción 718

Carretes de inducción. 718

Efectos de inducción producidos en el circuito secundario. 719

Diagramas de las dos corrientes primaria y secundaria 720

Perfeccionamientos del interruptor de martillo 720

Interruptor de Foucault y sus derivados. 721

Interruptores rotativos de contactos sucesivos. — Interruptor sin mercurio de Contremoulins 721

Interruptor electrolítico de Wehnelt. — Interruptores de orificios. 722

Aislamiento de los carretes de inducción. 722

Aplicaciones de los carretes de inducción. 722

LIBRO X

FENÓMENOS DE EQUILIBRIO Y DE TENSION ELÉCTRICOS

CAP. I. — <i>Ley de Coulomb. — Medida de las cargas eléctricas. — Conservación de la electricidad.</i>	723	Estudio teórico del campo en un punto infinitamente próximo a la superficie de un conductor	741
Ley de Coulomb. Masa eléctrica	723	Valor de la tensión eléctrica en un punto de la superficie de un conductor.	742
Relación entre la cantidad de electricidad y la masa eléctrica.	724	Trabajo eléctrico	742
Comparación de las cargas eléctricas por medio del cilindro de Faraday.	724	Potencial eléctrico.	743
Desarrollo simultáneo de las dos electricidades. — Principio de la conservación de la electricidad.	726	Diferencia de potencial entre dos conductores. — Potencial de un conductor.	743
CAP. II. — <i>Electrización superficial de los conductores. — Distribución de la electricidad. — Tensión eléctrica.</i>	727	Constancia del potencial en los diversos puntos de un conductor	744
Electrización superficial de los conductores.	727	Unidad electroestática de diferencias de potenciales.	745
Distribución de la electricidad en la superficie de un conductor	728	Variación del potencial de un conductor en la influencia eléctrica.	745
Densidad eléctrica superficial	728	Diferencia de potenciales entre dos puntos de un campo eléctrico	746
Tensión eléctrica	729	Regiones en que el potencial es constante	747
Acción de las puntas. — Viento eléctrico	730	Superficies equipotenciales	747
CAP. III. — <i>Influencia electroestática.</i>	731	Expresión de la fuerza en función del potencial	747
Fenómeno fundamental	731	Cálculo del potencial	748
Carga de un cuerpo por influencia.	732	Cálculo del potencial de un conductor.	749
Caso de un conductor que envuelve al cuerpo influyente.	732	CAP. VI. — <i>Máquinas eléctricas</i>	749
Teorema de Faraday	732	Definición. — Electróforo.	749
Influencia en un conductor ya cargado	734	Máquinas eléctricas de influencia. — Principio. — Replenisher.	750
CAP. IV. — <i>Efectos de la influencia eléctrica. — Pantallas eléctricas. — Dieléctricos</i>	735	Características de las máquinas eléctricas	751
Explicación de las atracciones y de las repulsiones eléctricas	735	Máquina de Wimshurst	751
Uso del electroscopio de panes de oro.	736	Máquina eléctrica de Holtz	753
Comunicación de la electricidad a distancia	736	Máquinas de frotamiento	755
<i>Propiedades de las capas eléctricas en equilibrio. — Pantallas eléctricas.</i>	737	CAP. VII. — <i>Capacidad eléctrica. — Condensadores.</i>	756
Acción de un conductor electrizado sobre un cuerpo colocado en su interior.	737	Relación entre la carga de un conductor y su potencial.	756
Pantallas eléctricas.	737	Capacidad eléctrica.	757
Dieléctricos.	738	Unidades de capacidad eléctrica. — Faradio. — Microfaradio	758
CAP. V. — <i>Campo eléctrico. — Líneas de fuerza. — Potencial eléctrico.</i>	739	Relación entre la carga de un conductor, su capacidad y su potencial.	758
Campo eléctrico.	739	Capacidad de una esfera. — Valores del faradio y del microfaradio.	758
Líneas de fuerza. — Fantasmas eléctricos	739	Comunicación de la electricidad entre dos conductores de capacidades diferentes.	758
Dirección y sentido de un campo eléctrico en las inmediaciones de un conductor electrizado	740	Proporcionalidad de la carga de un conductor y de su potencial. — Teoría.	759
		Unidad electroestática de capacidad.	759
		Capacidad de una esfera	760
		Unidad electromagnética cegesimal de capacidad eléctrica.	760

Condensadores. 760
 Condensación. — Condensadores. . . 760
 Definición de la capacidad de un condensador 762
 Efectos de los dieléctricos. — Poder inductor específico 762
 Construcción de los condensadores. — Acción de los condensadores en batería. 763
 Botella de Leyden. — Jarras eléctricas. 763
 Cálculo de la capacidad de un condensador 764
 Carga de los condensadores 765
 Descarga de los condensadores . . . 766
 Fenómeno de Kerr. 767

CAP. VIII. — *Medidas electroestáticas.*
Medida de la diferencia de potenciales.
 — *Electrómetros.* 769
 Electrómetros 769
 Electrómetros de cuadrantes. 769
 Electrómetro de Branly. 771
 Electrómetro capilar de Lippmann. . 772
 Medida del potencial en un punto del campo eléctrico. 774

Medida de una diferencia de potenciales en unidades electroestáticas. — *Electrómetros absolutos* 774
 Voltímetros electrostáticos 775
Medida de las capacidades y cargas eléctricas 775
 Medida de las capacidades 775
 Carga de un conductor o condensador cualesquiera. 776
 Comparación de las unidades electromagnéticas y de las electrostáticas. 776

CAP. IX. — *Energía electroestática.*
 — *Descargas eléctricas.* 777
 Trabajo necesario para cargar un conductor. 777
 Origen de la energía eléctrica producida por las máquinas. 778
 Recuperación de la energía eléctrica durante la descarga. 779
 Reversibilidad de las máquinas eléctricas. 779
 Efectos de las descargas de los condensadores en conductores y aisladores 780

LIBRO XI

DESCARGAS EN LOS GASES. — RAYOS X. — RADIOACTIVIDAD. OSCILACIONES ELÉCTRICAS.

CAP. I. — *Descargas en los gases.* — *Rayos catódicos.* — *Rayos X.* . . . 783
 Estudio de la chispa eléctrica. . . . 783
 Descargas en los gases enrarecidos. — Tubos de Geissler 783
 Tubos de Crookes. — Rayos catódicos. 785
 Constitución de los rayos catódicos. — Corpúsculos catódicos. 786
 Rayos canales de Goldstein. 787
 Electrones. — Nuevas hipótesis sobre la constitución de la materia . . . 788
 Rayos de Lenard 788
Rayos X. 788
 Rayos de Röntgen o rayos X. 788
 Propagación rectilínea de los rayos X. — Radioscopia y Radiografía. . 789
 Aplicaciones de los rayos X. 790
 Transparencia de los cuerpos por los rayos X. — Experimentos y leyes de Benoist. 790
 Transformaciones de los rayos X por la materia. 791
 Naturaleza de los rayos X. 792
 Ionización de los gases 792

CAP. II. — *Radioactividad.* 793
 Historia. 793
 Diversos efectos de la irradiación del radio 794

Medida de la radioactividad 795
 Caracteres de la radioactividad. — Preparación del radio. 795
 Naturaleza de la irradiación del radio. 797
 Calor desprendido por los cuerpos radioactivos. 798
 Teoría de la radioactividad. — Transformaciones de los cuerpos radioactivos 799
 Producción del helio a partir de los elementos radioactivos. — Relaciones entre los pesos atómicos de estos elementos. 801
 Origen de la energía que producen los cuerpos radioactivos. 803
 Radioactividad de diversos cuerpos . 803
 Patrón de radio. 803

CAP. III. — *Oscilaciones eléctricas.* . 805
 Descarga oscilante. 805
 Efectos de inducción de las descargas oscilantes. — Experimentos de Tesla. 807
 Experimentos de Hertz 808
 Velocidad de propagación y propiedades de las ondas electromagnéticas 809
 Experimentos diversos sobre las ondas electromagnéticas. 811
 Particularidades de la descarga del excitador de Hertz 812

LIBRO XII

APLICACIONES DE LA ELECTRICIDAD

CAP. I. — Aplicaciones de la electrólisis.	
— <i>Galvanoplastia. — Electroquímica.</i>	813
Galvanoplastia	813
Electrotipia	814
Plateado	814
Dorado	815
Niquelado	815
Baño de cobre	815
Electrometalurgia	815
Fabricación electrolítica de la sosa, del cloro, de los hipocloritos y cloratos alcalinos.	816
CAP. II. — Aplicaciones del transporte de la energía por la corriente eléctrica. — Alumbrado y calefacción eléctricos. — Aplicaciones de los motores eléctricos.	
<i>Alumbrado y calefacción eléctricos.</i>	816
Lámparas de incandescencia de filamento de carbón	816
Lámparas de filamento metálico.	817
Lámpara de Nernst.	818
Arco voltaico	818
Lámparas de arco.	819
Reguladores.	820
Lámparas de arco sin regulador. — Mechero Jamin	822
Instalación de una lámpara de arco. Lámparas eléctricas de luminiscencia. — Lámparas de vapor de mercurio de Cooper-Hewitt	823
Calefacción eléctrica.	824
Aplicación de la energía eléctrica para la fijación del nitrógeno atmosférico.	827
Producción del ozono. — Depuración de las aguas	828
<i>Aplicaciones de los motores eléctricos.</i>	828
Aplicaciones de los motores eléctricos a las máquinas herramientas	828
Tracción eléctrica.	829
Tranvías eléctricos	829
Ferrocarriles eléctricos	831
Automóviles eléctricos.	832
CAP. III. — Telegrafía. 832	
Definiciones. — Diversos órganos de un telégrafo eléctrico	832
Alambre de línea	833
Generadores de corriente	834
Telégrafo de cuadrante o de letras. — Sistema Breguet	834
Telégrafos de signos registrados. — Sistema Morse y sus derivados	835
Órganos accesorios	838
Telégrafos impresores. — Principio del sistema Hughes.	840
Telégrafos de transmisión rápida	840
Transmisión telegráfica de la escritura, de dibujos y fotografías	842
<i>Telegrafía submarina</i>	843
Anomalías de la transmisión por líneas submarinas	843
Sifón-recorder de Thomson (lord Kelvin).	844
<i>Telegrafía sin hilos.</i>	845
Aplicaciones de las ondas hertzianas a la telegrafía. — Radioconductores o cohesores	845
Aplicación del cohesor a la telegrafía sin hilos, o radiotelegrafía	847
Perfeccionamientos en los aparatos primitivos.	848
Emisión indirecta	849
Nuevos detectores.	850
Recepción indirecta. — Sincronismo. — Ondas musicales. — Ondas dirigidas	852
Distancia de las estaciones de telegrafía sin hilos. — Aplicaciones diversas.	853
CAP. IV. — Telefonía 854	
Definiciones y clasificación	854
Teléfono Bell	854
Otros teléfonos.	856
Micrófono (de Hughes)	856
Transmisores microfónicos.	857
Teléfonos y micrófonos combinados	858
Perfeccionamiento de Edison : empleo del carrete de inducción.	858
Redes telefónicas	859
Telefonía sin alambres por ondas electromagnéticas o radiotelefonía.	860
CAP. V. — Acciones fisiológicas de las corrientes y de las descargas eléctricas. — Aplicaciones médicas. 861	
Efectos fisiológicos de las corrientes.	861
Efectos de las descargas eléctricas	863
Aplicaciones médicas de las corrientes continuas y alternas, y de la electrolización estática	863
Aplicaciones de las corrientes de alta frecuencia. — Arsonvalización.	364

LIBRO XIII

METEOROLOGÍA Y CLIMATOLOGÍA

CAP. I. — <i>Meteoros</i>	867	Parhelios, círculos parhéllicos, coronas.	882
Objeto de la meteorología	867	CAP. II. — <i>Climatología</i>	883
<i>Meteoros aéreos</i>	867	Actinometría	883
Vientos	867	Temperatura media	884
Ciclones	869	Causas que modifican la temperatura del aire	884
Tornados	870	Líneas isotermas	886
Trombas	870	Climas	887
<i>Meteoros acuosos</i>	870	Distribución de la temperatura en la superficie del globo	887
Nubes	870	Temperatura de los mares, corrientes marinas	887
Formación de las nubes	872	Temperatura de los lagos y de los manantiales	888
Lluvia. — Pluviómetro	872	Distribución de las aguas en la superficie del globo	888
Nieblas. — Brumas	873	CAP. III. — <i>Previsión del tiempo</i>	889
Escarcha, sereno, rocío	873	Noticia histórica	889
Nieve, verglas	873	Elementos meteorológicos	889
Granizo	874	Depresiones o áreas de bajas presiones. Repartición de los meteoros en una depresión	890
<i>Meteoros eléctricos</i>	874	Trayectorias ordinarias de las depresiones	891
Descubrimiento de la electricidad de las nubes tempestuosas por Franklin. Potencial eléctrico en un punto de la atmósfera	874	Determinación de las depresiones	892
Electricidad de las nubes	875	Interpretación de las variaciones barométricas y de los vientos locales — Método de Guilbert	892
Fenómenos tempestuosos	876	Protección de las cosechas y lucha contra los meteoros	893
Ruido del trueno	876		
Efectos del rayo	877		
Explicación de las tormentas	877		
Pararrayos	878		
Pararrayos Melsens	879		
Aurora boreal	879		
<i>Meteoros luminosos</i>	881		
Arco iris	881		
Halos	882		

LIBRO XIV

COMPLEMENTOS Y PROBLEMAS DE FÍSICA

CAP. I. — <i>Cambios de unidades</i>	895	Sistema de unidades electroestáticas cegesimales	902
Variaciones del número que representa una magnitud dada, cuando se cambia la unidad que sirve para medir esta magnitud	895	Comparación de las dimensiones de una cantidad de electricidad en el sistema electromagnético cegesimal y en el sistema electroestático cegesimal	903
Aplicación a los sistemas de unidades racionales. — Cambio de las unidades fundamentales	895	CAP. II. — <i>Problemas de física con soluciones</i>	903
Superficie y volumen	896	<i>Principales constantes físicas</i>	924
Coefficientes y magnitudes sin dimensiones	896	<i>Cuerpos sólidos y líquidos</i>	924
Velocidad y aceleración	896	I. Densidades y dilataciones	924
Fuerza, presión, trabajo y potencia	898	II. Calores específicos. — Cambios de estado	925
Masa específica y peso específico	899	III. Resistividad de los sólidos, de los líquidos y de las soluciones	926
Homogeneidad de las fórmulas	899	<i>Cuerpos gaseosos</i>	928
<i>Dimensiones de las magnitudes eléctricas y magnéticas</i>	900	<i>Tabla alfabética</i>	929
Sistema de unidades electroestáticas cegesimales	900	<i>Tabla de materias</i>	957

PARIS

IMPRESA DE LA Vda DE CH. BOURET:
