

Libros de **Cátedra**

Industrialización de la madera

Transformación mecánica y química: tecnologías y puesta en valor sustentable

Gabriel D. Keil, Eleana M. Spavento y Natalia Raffaeli
(coordinadores)

n
naturales

FACULTAD DE
CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES


EduLP
EDITORIAL DE LA UNLP



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

INDUSTRIALIZACIÓN DE LA MADERA

TRANSFORMACIÓN MECÁNICA Y QUÍMICA: TECNOLOGÍAS Y PUESTA EN VALOR SUSTENTABLE

Gabriel D. Keil
Eleana M. Spavento
Natalia Raffaelli
(coordinadores)

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA


EDITORIAL DE LA UNLP

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de La Plata, y especialmente a su Editorial (EDULP), por la posibilidad brindada y el apoyo a este proyecto.

A la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, nuestro lugar de trabajo, por su interés y su acompañamiento, y por fomentar los viajes de estudio que han enriquecido nuestra formación y la de los alumnos.

Al Centro Tecnológico de la Madera de la UNLP y su personal, en especial a su Director, Ing. Ftal. Luis Martinelli, por su inestimable colaboración.

Al Dr. Ing. Ftal. Antonio José Barotto, compañero de Cátedra, por la lectura crítica y sus aportes al Capítulo 6.

A las empresas e instituciones vinculadas al sector forestal, por la buena predisposición, recepción y colaboración para compartir con docentes y alumnos su experiencia desde la óptica industrial privada y gubernamental.

A todos los estudiantes, con quienes hemos compartido los cursos y viajes vinculados a la valorización e industrialización de la madera, quienes a través de su interés, consultas, inquietudes y comentarios, han brindado sus aportes y proporcionado una de las principales razones por la cual escribir este libro.

Índice

Prólogo	5
<i>Ismael Andía</i>	
Introducción	6
Capítulo 1	
Situación foresto-industrial en Argentina	8
<i>Eleana M. Spavento, Gabriel D. Keil, Natalia Raffaeli</i>	
Capítulo 2	
Planificación de un aserradero: playa de trozas y proceso productivo	35
<i>Carla Taraborelli, Gabriel D. Keil</i>	
Capítulo 3	
Proceso de aserrado: sierras y mecanismos complementarios	59
<i>Gabriel D. Keil, Carla Taraborelli</i>	
Capítulo 4	
Proceso de aserrado: parámetros y factores que lo afectan	92
<i>M. Mercedes Refort, Eleana M. Spavento, Gabriel D. Keil</i>	
Capítulo 5	
Valor agregado en madera aserrada: secado y remanufactura	122
<i>Eleana M. Spavento, M. Mercedes Refort</i>	
Capítulo 6	
Dendroenergía: biocombustibles sólidos derivados de la madera	161
<i>Natalia Raffaeli</i>	
Conclusiones	195
Glosario	197
Los autores	199

Prólogo

Una obra ansiada y necesaria, es el primer pensamiento que vino a mí al conocer el proyecto del libro. Y me emociona una cosa: durante varios años, estando trabajando mucho sobre todo en la Tecnología de la Madera, pensé lo interesante y útil que sería una publicación como la que hoy nos alegra. No pude, aunque siempre lo anhelé. Habrá sido por una falta de decisión, o por haberme dedicado mucho tiempo a otras actividades universitarias. Pero lo hermoso de ahora es ver plasmado este sueño por quienes vinieron después. Y quienes vinieron después han conformado hasta el día de hoy un equipo muy consolidado y con una característica que reconozco muy valiosa. Me refiero a la integración entre disciplinas que conforman un todo relacionado inequívocamente con la actividad forestal industrial siempre con una mirada atenta en la protección y en el celoso cuidado del ambiente. No podía ser de otra manera y más en estas actividades. Esa visión, esa filosofía son las que nos presentan los autores

Recorriendo sus capítulos se ve el enlace impecable que han tenido en cuenta. El sólo hecho de presentar una obra integrada, ya enseña. Quizás en una época pasada las disciplinas que se abordan se estudiaban en forma aislada, pero felizmente no es éste el caso.

Los estudiantes de Ingeniería Forestal contarán con un aporte literario tecnológico que seguramente será de ayuda vital, tanto para su aprendizaje como para desarrollar el pensamiento crítico ante el abordaje. Ese pensamiento, ese análisis, no me cabe duda que los autores lo llevan en sí mismo y a la vez anhelan que sus estudiantes lleguen a desarrollarlo en su formación y en su vida profesional.

Pero estoy más que seguro que trascenderá el ámbito universitario para servir de útil consulta a otros técnicos, profesionales, productores y trabajadores.

Yo agradezco que a esta altura de mi vida pueda haber conocido este proyecto, producto de la universidad pública. Una obra, como dije al principio, ansiada y necesaria, una obra que va a perdurar. Gracias.

Ismael Andía

Ingeniero Forestal.

Ex Decano y Ex Profesor FCAYF. UNLP.

Ex Director, Ex Secretario Académico y Ex Profesor, UNComahue.

La Plata, Abril 2021.

Introducción

La madera constituye una de las materias primas naturales más versátiles utilizadas por el hombre desde el inicio de la civilización. Sus características diferenciales la tornan apta para una innumerable variedad de aplicaciones y usos, pudiendo ser aprovechada a través de transformaciones mecánicas y químicas, que la modifican en algún grado para adecuarla a su destino final.

La carrera de Ingeniería Forestal de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (FCAYF) de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), abarca en su currícula un eje tecnológico que contempla dichas transformaciones. En los cursos de Xilotecnología (tercer año), Industrias de Transformación Mecánica e Industrias de Transformación Química (ambos en quinto año), se profundiza sobre los cambios que atraviesa la madera antes de ser puesta en servicio, tanto para utilizarla en la construcción y producción de bienes como para aprovechar los residuos generados en dichos procesos, en especial con fines energéticos.

Este libro pretende brindar una mirada integradora sobre la industrialización de la madera, describiendo los requisitos de la materia prima, los procesos principales de su transformación y las tecnologías disponibles, dentro de un contexto de sustentabilidad. Se nutre no solo de los contenidos fundamentales pertinentes a cada tema, sino también de los viajes de estudio realizados por los docentes y alumnos a lo largo de tres décadas, visitando distintas regiones de nuestro país, una experiencia por demás significativa y enriquecedora. Asimismo, recoge los ensayos y/o resultados recabados a lo largo de los años en el Laboratorio de Investigaciones en Madera (LIMAD)¹ y en el Centro de Capacitación y Transferencia de Tecnología y/o Producción y Servicios, también conocido como Centro Tecnológico de la Madera (CTM)². Del mismo modo, los conceptos teóricos vertidos en esta obra permitirán su aplicación práctica en ambos ámbitos (LIMAD y CTM).

Para una mejor organización de los contenidos, este libro ha sido dividido en seis capítulos.

El capítulo 1 ofrece un panorama general sobre la situación foresto-industrial del país con énfasis en las industrias de transformación mecánica y química, caracterizando fuentes de materia prima, procesos, productos y mercados.

¹ El LIMAD es un laboratorio de investigación perteneciente a la FCAYF, UNLP, especializado en temas forestales. Se encuentra ubicado en diag. 113 N° 469. La Plata (1900). Argentina.

² El CTM es una instalación industrial propia de la FCAYF, UNLP, orientada a la investigación, extensión, docencia y capacitación para el sector foresto-industrial. Se encuentra ubicada en la localidad de Los Hornos, partido de La Plata (1900), dentro del predio de la Estación Experimental "Julio Hirschhorn" (EEJH), avenida 66 y 167 (-57°59'35" O, -34°59'10" S).

El capítulo 2 focaliza en los principios de organización de un aserradero, analizando factores como localización, energía disponible, fuente de trozas, disponibilidad de mano de obra, mercados y transporte, y caracterizando aserraderos portátiles y permanentes, diagrama de flujo y playa de trozas.

El capítulo 3 describe las plantas de aserrado más comunes, así como sus equipos principales y complementarios empleados desde la playa de trozas hasta la obtención de productos principales (madera aserrada) y secundarios (aserrín, chips, entre otras).

El capítulo 4 desarrolla los parámetros y factores más importantes del proceso de aserrado como así también los sistemas de corte más utilizados para la obtención de productos de madera aserrada. Asimismo, detalla las actividades necesarias para el mantenimiento de los elementos de corte intervinientes en el proceso.

El capítulo 5 se centra en la madera aserrada, sus características y en los procesos de secado, clasificación y remanufactura tendientes a la elaboración de productos de mayor valor agregado.

El capítulo 6 detalla la obtención, acondicionamiento y utilización de los residuos forestales y foresto-industriales para la producción de biocombustibles sólidos derivados de madera, incluyendo las tecnologías más difundidas en nuestro país, tanto a nivel doméstico, industrial y comercial.

Esta obra ha sido concebida, en primer lugar, para que los estudiantes de Ingeniería Forestal cuenten con una herramienta de apoyo que integre los contenidos del eje tecnológico de la carrera. Además, puede resultar interesante para estudiantes de carreras afines y profesionales que demanden los conceptos fundamentales acerca de la industrialización de la madera en nuestro país y el aprovechamiento de los residuos foresto-industriales.

Esperamos que sea de utilidad.

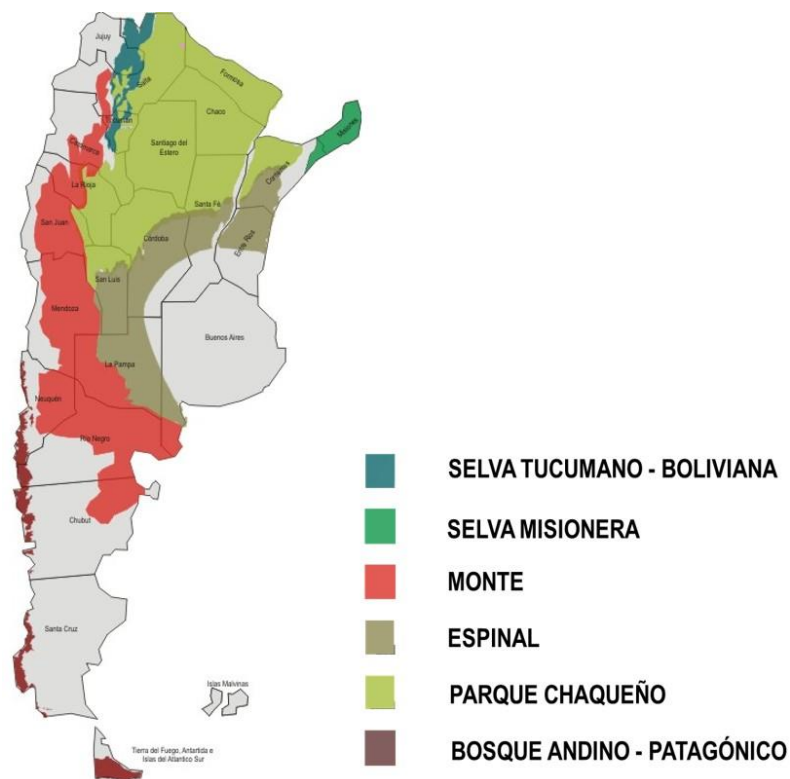
CAPÍTULO 1

Situación foresto-industrial en Argentina

Eleana M. Spavento, Gabriel D. Keil y Natalia Raffaelli

Consideraciones generales

De acuerdo con el Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos (OTBN), el patrimonio forestal de la República Argentina consiste en 1,37 millones de hectáreas de plantaciones forestales y 53,6 millones de hectáreas de bosques nativos. Dichos recursos se encuentran distribuidos principalmente en siete eco-regiones (Figura 1.1) que presentan características y dinámicas específicas, así como diferentes presiones humanas y naturales: Selva Misionera (Selva Paranaense), Selva Tucumano Boliviana (Yungas), Parque Chaqueño, Bosque Andino Patagónico, Espinal, Monte y Delta e Islas del Río Paraná (MAGyP, 2019).



*Figura 1.1. Eco-regiones.
Fuente: propia (2014).*

Asimismo, el país cuenta al menos con 3,7 millones de ha de tierras forestales disponibles para expandir las plantaciones sin afectar los sitios de alto valor de conservación, ni competir con los bosques nativos o con determinados cultivos (MAGyP, 2019).

En cuanto a su distribución, las provincias con mayor superficie de bosque nativo son Salta, Santiago del Estero, Chaco y Formosa, mientras que la participación minoritaria de los bosques nativos se encuentra en el sur del país. A excepción de Chubut, que presenta una superficie superior con respecto a otras provincias del país, los bosques nativos en el sur se destacan en orden de importancia, según la superficie forestada, en las provincias de Tierra del Fuego, Neuquén y Río Negro (Sharry, 2020).

Entre las especies nativas de mayor representación por región fitogeográfica se destacan: algarrobos (*Prosopis* sp.) y quebrachos (*Schinopsis* sp.; *Aspidosperma* sp.) en Parque Chaqueño; cebiles (*Anadenanthera* sp.; *Parapiptadenia* sp.), laurel (*Phoebe porphyria*) y nogal (*Juglans australis*) en Selva Tucumano Boliviana; cedro (*Cedrella angustifolia*), guatambú (*Balfourodendron riedelianum*) y peteribí (*Cordia trichotoma*) en Selva Misionera; y lenga (*Nothofagus pumilio*) en Bosque Andino-Patagónico.

De todos modos, el 95% de la industria de base forestal del país se provee de maderas de plantaciones de alta productividad. Del total de hectáreas de plantaciones forestales, un 78% de la superficie se encuentra en las provincias que componen la región mesopotámica y en el Delta del Río Paraná. Asimismo, la región mesopotámica presenta las mayores posibilidades de crecimiento, especialmente la provincia de Corrientes, dada por la disponibilidad de tierras de alta productividad forestal. La segunda región en importancia, en referencia a plantaciones forestales, es la región andino-patagónica (principalmente Patagonia norte), representando un 10% de la superficie. El 12% restante se distribuye entre Córdoba, Jujuy, Santa Fe, Mendoza y otras provincias (MAGyP, 2019).

Las principales especies plantadas a nivel nacional están representadas, en mayor proporción, por especies de coníferas entre las que se destacan *Pinus ellioti*, *P. taeda*, *P. ponderosa*, *Araucaria angustifolia* y *Pseudotsuga menziesii*. Le siguen las especies de latifoliadas del género *Eucalyptus* spp. (eucaliptos), siendo *E. grandis* la especie más importante, seguida por *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. viminalis* y *E. globulus*. Las latifoliadas del grupo de salicáceas son las terceras en representación a nivel nacional aunque en menor proporción que las anteriores; las especies más representativas son *Populus deltoides* y *P. x euroamericana* como principales representantes del género *Populus* spp. (álamos), y *Salix babylonica* var. *Sacramenta*, *S. nigra* e híbridos de *S. babylonica* x *S. alba*, *S. matsudana* x *S. alba* junto con nuevos clones aportados por INTA Delta, entre los representantes del género *Salix* spp. (sauces). Un porcentaje pequeño queda representado por otras especies cultivadas tales como roble sedoso (*Grevillea robusta*), kiri (*Paulownia tomentosa*), paraíso (*Melia azederach*) y toona o cedro australiano (*Toona ciliata*).

En cuanto a representación de especies según regiones y/o provincias del país, puede resumirse que en el noreste argentino (NEA o región mesopotámica) predominan las coníferas seguidas por latifoliadas del género *Eucalyptus*. En la zona del Delta de las provincias de Buenos Aires y Entre Ríos predominan *Salix* spp. y *Populus* spp. En la Patagonia Andina -Neuquén, Río

Negro y Chubut- predominan las coníferas, mientras que en los valles irrigados de la provincia de Río Negro y Neuquén predominan las especies de *Populus*, al igual que en los valles irrigados de Cuyo. En el noroeste argentino (NOA) -Salta, Jujuy y Tucumán- existen bosques cultivados de *Pinus* spp. y *Eucalyptus* spp., mientras que en la región Chaqueña -Formosa, Chaco y Santiago del Estero- se cultiva el algarrobo blanco (*Prosopis alba*). En la zona continental de la provincia de Buenos Aires se cultivan distintas especies del género *Eucalyptus* y en las zonas serranas, especies del género *Pinus*.

La madera que se genera en nuestro país puede insertarse en distintos ciclos productivos, tales como la industria de transformación mecánica (ITM) y la industria de transformación química (ITQ).

La industria de transformación mecánica de la madera abarca actividades heterogéneas entre las que pueden resumirse la industria de primera transformación, de segunda transformación de valor agregado bajo, medio y alto, y la industria de producción de láminas-chapas y de tableros a partir de debobinado o triturado (MAGyP, 2019).

La industria de transformación química de la madera incluye la caracterización de la materia prima y sus alteraciones industriales, la tecnología de procesos y los productos y subproductos derivados. Entre las actividades relevantes se encuentran la industria de la pulpa y el papel, la producción de biocombustibles sólidos como leña, carbón vegetal y densificados, y las industrias extractivas tales como las de producción de taninos, gomas, resinas y aceites esenciales.

A nivel nacional, existe mayor cantidad de información publicada vinculada a las ITM en relación a las ITQ. Es por ello que a continuación, se resumirán por regiones-provincias, las principales fuentes de materia prima e industrias de transformación mecánica y productos que aportan a la foresto-industria nacional. Luego, se describirá de forma integral la situación nacional para las ITQ en las regiones del país más significativas.

Industrias de transformación mecánica

Región mesopotámica

La región mesopotámica abarca las provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos. En la actualidad, es la región con mayor concentración de bosques cultivados y actividad foresto-industrial, constituyendo el polo más importante y desarrollado del país.

Asimismo, se destaca como la región con mayor consumo de materia prima. La materia prima procedente de especies cultivadas es la utilizada en mayor proporción para la ITM (aserrado y producción de tableros), con principal representación de pinos (*Pinus* spp.) y eucaliptos (*Eucalyptus* spp.) mayoritariamente; en menor proporción se utiliza pino paraná (*Araucaria angustifolia*), kiri (*Paulownia tomentosa*), paraíso (*Melia azedarach*), álamos (*Populus* spp.) y sauces (*Salix* spp). En cuanto a la madera procedente de bosque nativo (mínima representación en comparación con la materia prima de bosques implantados), las especies más importantes en las

ITM de esta región, están constituidas por anchico (*Parapiptadenia rigida*), guayubirá (*Patagonula americana*), guatambú (*Balfourodendron riedelianum*), peteribí (*Cordia trichotoma*), incienso (*Myrocarpus frondosus*), algarrobo blanco (*Prosopis alba*), quebracho colorado chaqueño (*Schinopsis balansae*) y urunday (*Astronium balansae*).

Dentro de las ITM, específicamente en la industria de aserrado, dicha región cuenta con la mayor cantidad de aserraderos a nivel nacional. Los mismos están representados, en porcentaje de existencia según tamaño, por aserraderos de categoría “micro”, cuya producción anual no supera los 940 m³; “pequeño”, cuya producción anual se encuentra entre los 940 y 4.720 m³; “mediano”, cuya producción anual se encuentra entre los 4.720 y los 23.583 m³; y en mínima proporción, por aserraderos de categoría “grande”, con una producción anual superior a 23.583 m³. Por su parte, en cuanto a porcentaje de producción, el orden de representación según tamaño se modifica (prácticamente, se invierte), siendo los aserraderos medianos los de mayor producción, seguidos en orden de importancia por los aserraderos grandes, pequeños y en menor representación, micro empresas (MA, 2015). En cuanto a los productos elaborados, predominan los de primera transformación, seguidos en menor proporción, y en orden de importancia, por productos de remanufactura de valor agregado medio, bajo y alto, los cuales serán detallados durante el desarrollo de cada provincia.

En cuanto a la ITM de madera debobinada y triturada destinada a la producción de tableros, el sector se encuentra desarrollado en las tres provincias.

En términos generales, todas las ITM se encuentran próximas a los centros de abastecimiento de materia prima o en cercanía del recurso forestal (plantaciones).

Provincia de Misiones

De acuerdo con el inventario provincial (2015), citado por el Censo de Aserraderos (MA, 2018, 2015), la provincia de Misiones cuenta con una superficie de plantaciones forestales que asciende a 405.824 ha de macizos. Entre las especies forestales predominan (aproximadamente 90%) las especies de pino (*Pinus* spp.), seguido por eucaliptos (*Eucalyptus* spp.) y en menor proporción, pino paraná (*Araucaria angustifolia*) y toona (*Toona ciliata*). Asimismo, cuenta además con un recurso importante de especies nativas varias, en algunos casos sin especificar, aunque entre las más importantes se pueden mencionar anchico (*Parapiptadenia rigida*), guayubirá (*Patagonula americana*), guatambú (*Balfourodendron riedelianum*), peteribí (*Cordia trichotoma*) e incienso (*Myrocarpus frondosus*) (Figuras 1.2 y 1.3).



*Figura 1.2. Plantación de Pinus spp. (Eldorado, Misiones).
Fuente: propia (viaje de estudios Ing. Ftal., 2016).*



*Figura 1.3. Selva misionera (Reserva Guaraní, Misiones).
Fuente: propia (viaje de estudios Ing. Ftal., 2016).*

La mayor proporción de la materia prima para las ITM proviene de bosques cultivados (locales o bien, proveniente de la provincia de Corrientes), con preponderancia en primer lugar de especies de pinos, seguidos en menor proporción y en orden de importancia, por eucaliptos, araucaria y otras cultivadas (kiri, paraíso y toona) (MA, 2018).

Respecto a la ITM de aserrado, dicha provincia cuenta con la mayor representación de aserraderos en la región. En cuanto a categoría, predominan los aserraderos de categoría “micro”, seguido por los de categoría “pequeño”, luego por los de categoría “mediano”, finalizando en menor proporción por los de categoría “grande”.

En cuanto a los productos, predominan los de primera transformación -madera aserrada-seguidos, en orden de importancia, por productos de segunda transformación o remanufactura de valor agregado medio -madera aserrada y procesada, secada naturalmente o en horno, cepillada-, luego por productos de valor agregado alto -madera aserrada y procesada, con segunda

industrialización-, finalizando con productos de valor agregado bajo -madera aserrada sin secado con segunda transformación- (MA, 2018; 2015).

Entre los productos de primera transformación, predominan las tablas dimensionadas y en menor proporción, los tirantes. Le siguen, en orden de importancia, tablones, vigas, alfajías, varillas, listones y otros (indicados como rollizos en sándwich) (MA, 2018; 2015).

En cuanto a los productos de remanufactura de valor agregado medio se destacan en mayor proporción los machimbres, seguidos, en orden de participación, por molduras, flejes, cepillados, otros (sin especificar), pisos, cabos de herramientas-escobas y en una mínima proporción, por zócalos (MA, 2018). Entre los productos de valor agregado alto se destacan los tableros alistados, seguidos por vigas laminadas y en menor proporción, detallados en orden de representación, por muebles, aberturas y carpintería en general. Como productos de remanufactura de bajo valor agregado, se destaca ampliamente la producción de pallets con una mínima producción de cajones (MA, 2018).

En lo que respecta a la ITM de producción de tableros, se destacan dos empresas que procesan madera mediante desenrollo (corte rotativo-debobinado), tanto para la producción y comercialización de láminas como para la producción de tableros compensados o también denominados, contrachapados (ureicos y fenólicos según el adhesivo que utilicen). Estas industrias emplean fundamentalmente especies cultivadas de *Eucalyptus* spp. y *Pinus* spp. Asimismo, existen industrias con menor producción, que elaboran y comercializan chapas de madera, a través del proceso de faqueado (corte plano), para el revestimiento de muebles o productos de mayor calidad. En este caso, con predominio de especies de bosque nativo.

En cuanto a la industria del triturado para la producción de tableros, se destaca una empresa que fabrica tableros de fibras de mediana densidad (MDF) que emplea fundamentalmente madera de *Eucalyptus* spp. y *Pinus* spp.

Provincia de Corrientes

La provincia de Corrientes cuenta con 425.987,40 ha forestadas, de las cuales la mayor representación (aproximadamente 60%) corresponde a *Pinus* spp., seguido por *Eucalyptus* spp.³, y luego por una superficie inferior representada por otras especies de edad desconocida, de las cuales en algunos casos se puede identificar el género pero no la especie y en otros casos, no se puede identificar género ni especie, pero son consideradas leñosas (MA, 2018).

La mayor representación de especies en volumen, empleadas en ITM, está encabezada por el género *Pinus* spp., seguido por *Eucalyptus* spp. y en mucha menor proporción por el género *Salix* spp., al cual le siguen en orden de importancia otras especies cultivadas no especificadas. Por su parte, la mínima representación en volumen empleado de especies nativas está constituida por urunday (*Astronium balansae*), quebracho colorado chaqueño (*Schinopsis balansae*) y algarrobos (*Prosopis* spp.) (MA, 2018).

³ En comparación con el inventario 2007/2008, la superficie de plantaciones de *Pinus* spp. registró un incremento a diferencia de la superficie de plantaciones de *Eucalyptus* spp., la cual manifestó un decrecimiento (MA, 2018).

Respecto a la ITM de aserrado, esta provincia cuenta con la menor representación de aserraderos en la región. En cuanto a categoría, predominan los aserraderos de categoría “pequeño”, seguidos por los de categoría “mediano”, luego por los de categoría “micro”, finalizando en menor proporción por los de categoría “grande” (MA, 2018; 2015).

En cuanto a productos, los de primera transformación -madera aserrada- son los de mayor representatividad, seguidos por los productos de remanufactura de valor agregado medio, bajo y alto, expresados en orden descendente de importancia (MA, 2018).

Entre los productos de primera transformación predominan las tablas seguidas por tirantes, entre otros de menor participación tales como varillas, listones, tablones, alfajías y vigas. Los productos de remanufactura de valor agregado medio están representados por machimbres, seguidos por molduras y en menor proporción, *decks*, zócalos, pisos de madera, madera cepillada y flejes. Los de bajo valor agregado están ampliamente dominados por pallets y en menor proporción, cajones. Por último, los productos de alto valor agregado están encabezados por tablero de listones, seguidos por aberturas, vigas laminadas, muebles y carpintería rural (con mucho menor representatividad, destacándose la fabricación de tranqueras y mangas) (MA, 2018).

En cuanto a las ITM de producción de tableros de envergadura, se destaca una empresa que procesa madera por desenrollo para la producción de tableros compensados (ureicos y fenólicos dependiendo del adhesivo empleado). Su materia prima fundamental está representada por *Eucalyptus* spp.

Provincia de Entre Ríos

De acuerdo con lo reportado en el Censo de Aserraderos (MA, 2017), la superficie con plantaciones forestales de la provincia de Entre Ríos asciende a 154.000 ha representadas en mayor proporción por especies de *Eucalyptus* spp. (70% aproximadamente), seguidas por especies de coníferas (*Pinus* spp.), y en menor proporción por salicáceas (*Populus* spp. y *Salix* spp.), con una mínima representación en superficie de especies cultivadas sin especificar.

En cuanto a la proporción de materia prima utilizada para las ITM, el mayor porcentaje está representado por eucaliptos (Figura 1.4), seguido en menor proporción por pinos y por una menor representatividad de álamos, sauces y otras cultivadas (sin especificar). Del mismo modo, cuenta con un mínimo porcentaje de especies nativas, representadas fundamentalmente por algarrobos (*Prosopis* spp.). La mayor proporción de la materia prima utilizada proviene de la misma provincia de Entre Ríos, como así también de la provincia de Corrientes, y en significativa menor proporción, de las provincias de Santa Fe, Misiones, y Buenos Aires; en general, son especies cultivadas con una mínima proporción son especies nativas (MA, 2017).



Figura 1.4. Plantación de *Eucalyptus grandis* (Ubajay, Entre Ríos).
Fuente: propia (viaje de estudios Ing. Ftal., 2019).

Respecto a la ITM de aserrado, dicha provincia cuenta con una representación intermedia de aserraderos respecto a las otras dos provincias mesopotámicas. En cuanto a categoría, al igual que en la provincia de Corrientes, predominan los aserraderos de categoría “pequeño”, seguidos por los de categoría “mediano”, luego por los de categoría “micro”, finalizando en menor proporción por los de categoría “grande” (MA, 2017).

En cuanto a la elaboración total de productos, la misma está dominada principalmente por los de primera transformación -madera aserrada sin secado- representados en su mayoría por la producción de tablas, seguidas por tirantes, listones (incluidos en ellos los tacos, tirantillos, varillas, vigas y alfajías), y en menor proporción durmientes. En orden de importancia, le sigue el sector de remanufactura de bajo valor agregado, destacándose la producción de pallets, y en menor proporción la elaboración de cajones y *bins*⁴. Seguidamente, se ubica el sector de remanufactura de valor agregado medio, entre los que se destaca la fabricación de machimbres, seguido en menor proporción y en orden de importancia, por la fabricación de decks, pisos de madera, molduras y zócalos. El sector de remanufactura de alto valor agregado es el que menor producción en volumen presenta, destacándose la fabricación de tableros de listones, vigas laminadas y en menor proporción, la carpintería en general (MA, 2017).

En lo que respecta a las ITM de producción de tableros, se destacan dos empresas dedicadas a la industria del triturado, una de ellas, dedicada a la fabricación de tableros de partículas y la otra a la fabricación de tableros de partículas y de fibras. La materia prima de ambas industrias está principalmente representada por *Eucalyptus grandis* y *Pinus* spp.

⁴ Bins: cajas de madera (sin tapa) que se emplean principalmente para la recolección de productos frutícolas.

Región patagónica

La región patagónica se divide en dos zonas bien definidas: Patagonia Andina Secano y Patagonia Valles Irrigados.

En Patagonia Andina Secano, la mayor superficie de plantaciones se encuentra en la provincia de Neuquén, seguida en orden de superficie forestada, por la provincia de Chubut y en tercer lugar, por la provincia de Río Negro. El recurso forestal nativo de esta zona está representado principalmente por lenga (*Nothofagus pumilio*), ciprés de la cordillera (*Astrocedrus chilensis*) y coihue (*Nothofagus dombeyi*). El recurso forestal cultivado está representado fundamentalmente por pino ponderosa (*Pinus ponderosa*), pino contorta (*Pinus contorta*), pino murrayana (*Pinus murrayana*) y pino oregón (*Pseudotsuga menziesii*).

En la zona de Patagonia Valles Irrigados de los ríos Limay, Negro y Colorado, el mayor desarrollo foresto-industrial se encuentra en el Alto Valle, seguido por el Valle Medio y en menor medida, por el Valle Inferior. De las 171.000 ha irrigadas en la zona, 2.300 ha son forestadas, donde 1.100 ha corresponden a Río Negro, 600 ha a Neuquén, y 600 ha a La Pampa. Una superficie mínima forestada, de las totales irrigadas que existen en la zona, contempla forestaciones combinadas principalmente con producciones frutales y forrajeras. El recurso forestal de esta zona lo aportan especies implantadas, mayoritariamente representadas por distintos clones de álamos: *Populus x euroamericana* cv. I-214; *P. x euroamericana* cv. I-488; *P. x euroamericana* cv. Conti 12 y *P. x euroamericana* cv. Guardi, actualmente con crecientes proyectos silvopastoriles.

En cuanto a la ITM de aserrado, en la región patagónica en general, se encuentra una gran cantidad de aserraderos de escala “micro” y algunos “pequeños”, siendo menos frecuentes los aserraderos de escala “mediana” y “grande”.

Los productos obtenidos son básicamente de primera transformación, mientras que los productos de remanufactura tanto de medio como de alto valor agregado, presentan un crecimiento muy lento con un déficit importante en la capacidad de secado de la madera.

Por otro lado, la característica distintiva de la región lo constituye la provincia de Tierra del Fuego, ya que no cuenta con superficie forestal implantada y el recurso foresto-industrial proviene de los bosques nativos de lenga (*Nothofagus pumilio*).

En cuanto a la ITM de tableros, en la región patagónica sólo se encuentran algunas fábricas de tableros compensados, asociadas a los embalajes de la producción fruti-hortícola de los valles irrigados, fundamentalmente fabricados con madera de *Populus* spp. La industria de tableros de fibras y/o partículas que utilizan productos secundarios generados por los aserraderos no se registran en dicha región.

Provincia de Tierra del Fuego

Tal como se comentó anteriormente, en esta provincia no hay existencia de bosques implantados. El bosque nativo está conformado por tres especies: lenga (*Nothofagus pumilio*), ñire (*Nothofagus antarctica*) y guindo (*Nothofagus betuloides*), siendo exclusivamente la madera de lenga

la utilizada por los aserraderos. Anualmente, se autorizan extracciones selectivas para la industria; según datos del MA (2017), en el año 2015 se autorizaron más de 600 ha para las extracciones en bosques de lenga privados y fiscales.

En cuanto a la ITM de aserrado, la provincia cuenta con aserraderos portátiles (en menor proporción) trabajando dentro del bosque sin localización fija, y con aserraderos permanentes, los cuales están localizados en la localidad de Tolhuin, en el centro de la provincia (Figura 1.5). Predominan los aserraderos de escala “pequeña”, seguidos por los de escala “micro” y en menor proporción, por los aserraderos “medianos”. No existen aserraderos clasificados como “grandes”.



Figura 1.5. Aserradero permanente de *Nothofagus pumilio* (Tolhuin, Tierra del Fuego).
Fuente: propia (pasantía estudiantil, 2017).

Los productos de los aserraderos, en cuanto a volumen de producción, son fundamentalmente de primera transformación, siguiendo en orden de importancia, los productos de remanufactura de bajo valor agregado, representados por embalajes. Entre ellos, los *pallets* son los más difundidos en el sector industrial provincial; en menor escala se fabrican cajones y *bins*. A continuación y en orden de importancia, se encuentran los productos de remanufactura de valor agregado medio tales como madera aserrada secada natural o en horno, con o sin cepillado y machimbres; por último, los productos de remanufactura de alto valor agregado como molduras, madera torneada y carpintería en general (MA, 2017).

En cuanto a la ITM de tableros, no hay existencia en la provincia.

Provincia de Neuquén

De acuerdo con el Inventario Patagonia Andina del año 2017, la superficie con plantaciones forestales en la provincia asciende a 64.125 ha de macizos y 2.415 km de cortinas (MA, 2017). La principal especie cultivada es el pino ponderosa (*Pinus ponderosa*, Figura 1.6), seguida por pino contorta (*Pinus murrayana* var. *contorta*), pino murrayana (*Pinus murrayana*), pino oregón (*Pseudotsuga menziesii*) y distintos clones de álamo (*Populus* spp.) en los valles irrigados. Con

respecto a las especies nativas, se advierte un predominio de coihue (*Nothofagus dombeyi*) seguido por roble pellín (*Nothofagus obliqua*).



Figura 1.6. Rodales de *Pinus ponderosa* (Abra Ancha, Neuquén).
Fuente: propia (viaje de estudios Ing. Ftal., 2015).

En cuanto a la ITM de aserrado, casi la totalidad de aserraderos presentes en la provincia corresponden a la categoría “micro” según su volumen de producción (MA, 2015). Los aserraderos de categoría “grande”, están concentrados en una única empresa de capitales mayoritariamente provinciales, que posee tres importantes plantas industriales distribuidas en la provincia.

Con respecto a los productos, predominan los de remanufactura de bajo valor agregado, entre los que se destacan las tablas y los tirantes. En orden de importancia, existe una participación significativa de la transformación primaria, mediante la cual se produce madera aserrada verde, varillas para alambrados, tacos y tablas para el armado de *bins* y *pallets*, como así también tablas y tirantes para encofrado (MA, 2015). Asimismo, existe una participación importante de productos remanufacturados de alto valor agregado, entre los que se destacan los bloques de madera encastrada (BME), en este caso únicamente de *Pinus ponderosa* (Figura 1.7), seguido por vigas laminadas y en menor proporción, machimbres.

Además, se produce y comercializa una gran variedad de productos de madera redonda con diversos tipos de transformación y para distintos usos: rollizos descortezados, cilindrados y/o machimbrados para cabañas; postes para alambrado y para tendido aéreo, impregnados con óxidos de cobre, cromo y arsénico (CCA), varas canteadas, entre otros. También se producen revestimientos exteriores de madera redonda descortezada y cilindrada, o con una cara plana, cepillada y/o machimbrada, con canto vivo.

En cuanto a la ITM de tableros, existen industrias de tableros compensados (principalmente terciados) de *Populus* spp., vinculadas a la fabricación de embalajes para el sector fruti-hortícola.



Figura 1.7. Construcción con BME (Abra Ancha, Neuquén).
Fuente: propia (viaje de estudios Ing. Ftal., 2018).

Provincia de Chubut

La superficie con plantaciones forestales en esta provincia, correspondiente al año 2015, asciende a 33.766 ha de macizos (33.446 ha de coníferas, 320 ha de salicáceas) y a 1.797 km de cortinas de salicáceas (MA, 2018). Los bosques implantados representan el recurso forestal más importante, donde el pino ponderosa (*Pinus ponderosa*) es la especie predominante con 30.585 ha, siguiendo en orden de importancia, el pino oregón (*Pseudotsuga menziesii*), el pino contorta (*Pinus murrayana* var. *contorta*) y el pino murrayana (*Pinus murrayana*). Los bosques nativos, representados en menor proporción, están constituidos por lenga (*Nothofagus pumilio*), ciprés de la cordillera (*Astrocedrus chilensis*) y coihue (*Nothofagus dombeyi*).

En cuanto a la ITM de aserrado, la mayoría de los aserraderos existentes son clasificados como “micro” (MA, 2018).

En lo que se refiere a productos finales, en primer lugar se ubican los de remanufactura de valor agregado alto como madera procesada para la fabricación de muebles y aberturas, principalmente. En segundo lugar, y con un nivel de producción semejante, se encuentran los productos de primera transformación -madera aserrada sin secado- tales como tirantes y tablas; finalmente y en escala significativamente menor se encuentran los productos de remanufactura de valor agregado medio -madera procesada, secada naturalmente o en horno, cepillada- como machimbre y cantoneras, entre otros.

En cuanto a la ITM de tableros, no hay existencia en la provincia.

Provincia de Río Negro

La superficie con plantaciones forestales en la provincia, correspondientes al año 2015, asciende a 12.870 ha de macizos (11.860 ha de coníferas, 1.010 ha de salicáceas), y 6.823 km de cortinas de salicáceas (MA, 2018). El recurso forestal es predominantemente representado por especies cultivadas de *Pinus ponderosa* (Figura 1.8), como así de *Populus* spp., en algunos casos integrando sistemas silvopastoriles (Figura 1.9). El recurso forestal nativo está representado por ciprés de la cordillera (*Astrocedrus chilensis*), coihue (*Nothofagus dombeyi*) y radial (*Lomatia irsuta*).



Figura 1.8. Forestación de *Pinus ponderosa* (Bariloche, Río Negro).
Fuente: propia (viaje de estudios Ing. Ftal., 2014).



Figura 1.9. Cultivo de *Populus* spp. en sistema silvopastoril (Catriel, Neuquén).
Fuente: propia (2013).

En cuanto a la ITM de aserrado, según su volumen de producción anual, predominan los aserraderos clasificados como “micro”, seguido en orden de importancia por los de escala “pequeña” y “mediana” (sólo uno), sin existencia de aserraderos en la categoría “grande” (MA, 2018).

En cuanto a los productos, básicamente se producen aquellos de primera transformación y de remanufactura de bajo valor agregado como tablas, tirantes, *pallets*, *bins* y cajones. La elaboración de productos de valor agregado medio tales como como cepillados, machimbres y pisos, es escasa, mientras que la producción de remanufacturas de alto valor como muebles, paneles, aberturas y artesanías, es prácticamente marginal (MA, 2018).

En cuanto a la ITM de tableros, existen industrias de tableros compensados (principalmente terciados) de *Populus* spp., vinculadas a la fabricación de embalajes para el sector fruti-hortícola.

Región noroeste

A diferencia de lo mencionado en las regiones anteriores, el recurso forestal de esta región es predominantemente nativo, con una superficie de 16 millones de ha, representando aproximadamente la mitad del total nacional. El 78% de estos bosques tienen las características de la región natural del Parque Chaqueño, mayoritariamente en Santiago del Estero, Chaco y oeste de Salta; el resto se corresponde con la Selva Tucumano Boliviana, representada por las provincias de Salta y Jujuy, principalmente.

Las principales especies nativas que aportan el recurso forestal son quebracho colorado chaqueño (*Schinopsis balansae*), quebracho colorado santiagueño (*Schinopsis quebracho colorado*), guayacán (*Caesalpinia paraguariensis*), quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho blanco*), urunday (*Astronium balansae*) y algarrobo blanco (*Prosopis alba*), dentro del Parque Chaqueño. La Selva Tucumano Boliviana aporta cedros (*Cedrela spp.*), peteribí (*Cordia trichotoma*), timbó (*Enterolobium contortisiliquum*), viraró (*Pterogine nitens*), cebil (*Anadenanthera colubrina* var. *cebil*) y urundel (*Astronium urundeuva* var. *urundeuva*), entre las más importantes.

En cuanto a los bosques implantados, existen enriquecimientos con peteribí, caña fistula (*Cassia fistula*), tipa blanca (*Tipuana tipu*) y algarrobo blanco (*Prosopis alba*), principalmente; además de otras especies exóticas como toona (*Toona ciliata*) y caoba (*Swietenia macrophylla*).

En cuanto a la ITM de aserrado, la región tiene rasgos casi artesanales, con equipamiento al límite de la obsolescencia, de baja productividad y con bajos rendimientos en madera aserrada. Los productos obtenidos son de valor agregado medio o alto, aunque producidos con equipamiento precario, básicamente utilizados para la industria del mueble y carpintería rural.

Provincia de Santiago del Estero

La provincia cuenta con un total de 5.580 ha forestadas (MA, 2017). Dentro de ella, se destaca en superficie, como especie principal, el algarrobo blanco (*Prosopis alba*, Figura 1.10), seguido de álamo (*Populus spp.*), pino (*Pinus spp.*) y eucalipto (*Eucalyptus spp.*), en menor proporción.



Figura 1.10. Plantaciones de *Prosopis alba* bajo riego (Campo Gallo, Santiago del Estero).
Fuente: propia (viaje de estudios Ing. Ftal., 2019).

En cuanto a la ITM de aserrado, se destaca que prácticamente la totalidad de las especies utilizadas como materia prima son nativas (99,7%), entre las que predominan en procesamiento, el quebracho blanco y el quebracho colorado, siendo procesado también, aunque en menor proporción, el algarrobo blanco.

En cuanto a la escala de producción, la mayor proporción de aserraderos de la provincia corresponde a la escala “micro” y en menor proporción, “pequeña” (MA, 2017).

En cuanto a los productos de aserrado, se distinguen dos grupos. Uno de ellos, con mayor representación, se corresponde a productos de remanufactura de bajo valor agregado, dominado por la producción de durmientes (Figuras 1.11 y 1.12), y en menor medida, por producción de varillas, tablas, tirantes, tirantillos, tablones, alfajías y vigas. Mientras que el otro grupo, representado en menor proporción, se corresponde a productos de remanufactura de alto valor agregado, entre los que se destacan, muebles, aberturas, carpintería rural y pisos.



Figura 1.11. Durmientes de *Schinopsis quebracho colorado* (Monte Quemado, Santiago del Estero).
Fuente: propia (viaje de estudios Ing. Ftal., 2019).



Figura 1.12. Durmientes de *Aspidosperma quebracho blanco* (Monte Quemado, Santiago del Estero).
Fuente: propia (viaje de estudios Ing. Ftal., 2019).

En cuanto a la ITM de tableros, no hay existencia en la provincia.

Provincia de Chaco

Esta provincia cuenta con 5.268.115 ha de bosques nativos, con una mínima representación de bosques cultivados de *Pinus* spp. de aproximadamente 600 ha (MA, 2018).

En términos generales, el consumo de madera proviene mayoritariamente de los bosques nativos (Figura 1.13). Entre las especies predominantes se encuentran: algarrobo blanco (*Prosopis alba*), quebracho colorado chaqueño (*Schinopsis balansae*), guayaibí (*Patagonula americana*), palo blanco (*Calycophyllum multiflorum*) y urunday (*Astronium balansae*); en menor medida se utilizan otras especies nativas como vinal (*Prosopis ruscifolia*), guayacán (*Caesalpinia paraguariensis*), guaramina (*Sideroxylon obtusifolium*), ibirá pita (*Peltophorum dubium*), itín (*Prosopis kuntzei*), lapacho (*Tabebuia ipe*), pacará (*Enterolobium contortisiliquum*) y mora blanca (*Alchornea iricurana*).



Figura 1.13. Trozas de *Schinopsis balansae* (Tres Isletas, Chaco).
Fuente: propia (viaje de estudios Ing. Ftal., 2017).

En cuanto a la ITM de aserrado, de la totalidad de aserraderos existentes, predominan los de categoría “micro” seguidos, en menor proporción, por los de categoría “pequeños” (MA, 2018).

En referencia a los productos obtenidos de dichos aserraderos, el mayor porcentaje se corresponde con la industria de transformación primaria -madera aserrada verde-, entre los que se destacan durmientes, seguidos por postes, tablas, varillas y, en menor medida, por vigas, tablones, tirantes y alfajías. En orden de importancia, le siguen los productos de remanufactura de bajo valor agregado donde predomina la producción de embalajes; a continuación aparecen los productos de remanufactura de valor agregado medio tales como cepillados, machimbres, zócalos, flejes y pisos; por último, se encuentran los productos de alto valor agregado entre los que se destacan muebles y, en significativa menor producción, aberturas y carpintería rural (MA, 2018).

En cuanto a la ITM de tableros, no hay existencia en la provincia.

Provincia de Salta

La provincia cuenta con 61.924 ha de bosques nativos y 6.082 ha de bosques cultivados. En el primer grupo, el cebil colorado (*Anadenanthera colubrina*) es la principal especie en lo que a la

industria de transformación mecánica se refiere. Le siguen en orden de importancia, palo amarillo (*Phyllostyllum ramnoides*), cedro (*Cedrella angustifolia*), quina (*Miroxilon peruviferum*), urundel (*Astronium urundeuva* var. *urundeuva*), quebracho colorado chaqueño (*Schinopsis balansae*), quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho blanco*), palo blanco (*Calycophyllum multiflorum*), algarrobo blanco (*Prosopis alba*), lapacho (*Tabebuia ipe*) y otras nativas como tipa (*Tipuana tipu*), roble (*Amburana cearensis*), mistol (*Ziziphus mistol*), pacará (*Enterolobium contortisiliquum*), peteribí (*Cordia trichotoma*), viraró (*Ruprechtia salicifolia*); palo santo (*Bursera graveolens*), mora blanca (*Alchornea iricurana*), nogal criollo (*Juglans australis*), guayacán (*Caesalpinia paraguariensis*) y espinillo (*Acacia caven*). En cuanto a los bosques cultivados, las especies de mayor representación pertenecen a *Eucalyptus* spp., seguido por *Pinus* spp. y en menor escala, por *Salix* spp. (MA, 2017).

En cuanto a la ITM de aserrado, del total de aserraderos disponibles y censados, predominan los de categoría “micro”, seguidos, en menor proporción, por los de categoría “pequeños” (MA, 2017).

La producción es predominantemente de primera transformación, con productos tales como tablas, vigas y tablones verdes. Asimismo existen productos de remanufactura, en general, de bajo valor agregado, como tablas dimensionadas y embalajes y, en menor proporción, productos de remanufactura de valor agregado medio, como tablas para carpintería a medida, vigas, zócalos y machimbre (MA, 2017).



Figura 1.14. Productos de aserrado de especies nativas (Orán, Salta).
Fuente: propia (2018).

En cuanto a la ITM de tableros, no hay existencia en la provincia.

Provincia de Jujuy

En esta provincia existen aproximadamente 1 millón de hectáreas de bosques nativos, de las cuales se estima que 800.000 ha tienen la posibilidad de ser aprovechadas de forma sustentable (MA, 2017). Entre las especies más representativas se encuentran: cedro (*Cedrella angustifolia*), quina (*Miroxilon peruviferum*), cebil (*Anadenanthera colubrina* var. *cebil*), palo amarillo (*Phyllostyllum ramnoides*), lapacho (*Tabebuia ipe*), nogal criollo (*Juglans australis*),

quebracho colorado chaqueño (*Schinopsis balansae*), mora blanca (*Alchornea iricurana*), urundel (*Astronium urundeuva* var. *urundeuva*), peteribí (*Cordia trichotoma*) y palo blanco (*Calycophyllum multiflorum*). En cuanto al recurso forestal implantado, la superficie con plantaciones forestales asciende a 13.697 ha representadas por especies de coníferas (*Pinus* spp.) y latifoliadas (*Eucalyptus* spp.) (MA, 2017).

En cuanto a la ITM de aserrado, predominan los de categoría “micro”, seguidos, en menor proporción, por los de categoría “pequeños” (MA, 2017). La materia prima de dichos aserraderos proviene de bosques implantados y nativos en diferentes proporciones.

En cuanto a los productos generados por los aserraderos de la provincia, la mayor proporción está representada por los de remanufactura de bajo valor agregado, como embalajes y palos de escoba, seguidos, en menor proporción, por tablas. En menor medida, se fabrican productos de remanufactura de alto valor agregado como aberturas y pisos de madera, seguidos por carpintería en general (MA, 2017).

En cuanto a la ITM de tableros, no hay existencia en la provincia.

Otras regiones

En este apartado se analizan otras regiones representadas por dos provincias que realizan un aporte importante al sector foresto-industrial del país. Por un lado, la provincia de Buenos Aires con dos zonas bien diferenciadas, como son la producción en secano y la producción en las islas del Delta del Río Paraná, y por otro lado, la provincia de Mendoza, como una de las más representativas en lo que a la industria de transformación mecánica de la región de Cuyo refiere.

En ambas provincias, el recurso forestal está representado por maderas cultivadas. En lo que respecta a la provincia de Buenos Aires, el 84% del volumen total de madera rolliza ingresada a los aserraderos corresponde, en orden de importancia, a madera de *Populus* spp. y de *Eucalyptus* spp. El 16% restante corresponde a *Pinus* spp. y a *Salix* spp. y, en menor medida, a otras especies cultivadas como kiri (*Paulownia tomentosa*), fresno (*Fraxinus* spp.) y roble (*Quercus* spp.) (MA, 2017). Por su parte, en Mendoza, el recurso forestal que abastece a los aserraderos está principalmente representado por especies del género *Populus*.

En cuanto a las ITM de aserrado, en ambos casos predominan los productos de primera transformación, seguido por productos de bajo valor agregado, y en menor medida, por productos de valor agregado medio-alto.

En cuanto a la ITM de tableros, en ambas provincias existen empresas dedicadas a la fabricación de tableros de partículas de gran envergadura, como así también empresas dedicadas a la industria del debobinado y de tableros compensados.

Provincia de Buenos Aires

La superficie con plantaciones forestales en esta provincia, asciende a 60.091 ha de macizos con salicáceas (*Salix* spp. y *Populus* spp.) ubicadas en la región del Delta del Río Paraná (Figura 1.15), y 7.818 ha de macizos con *Eucalyptus* spp. ubicadas en la región de secano, específicamente en el sudeste de la provincia (MA, 2017). Por su parte, en la región de secano correspondiente a las sierras de Tandil y Balcarce, existen plantaciones de *Pinus radiata* con manejo de podas para la producción de madera aserrada de calidad.



Figura 1.15. Plantación de *Salix* spp. (INTA Delta Otamendi, Buenos Aires).
Fuente: Cerrillo (2017).

De la totalidad de aserraderos censados, la mayor proporción corresponde a la clasificación “micro”, seguidos en menor proporción, por aserraderos “pequeños”, contando con un único aserradero de escala “mediana” más tecnificado (MA, 2018).

En cuanto a la ITM de aserrado, en la región del Delta del Río Paraná, predominan los productos de primera transformación como tablas, tirantes y tablones de especies de *Salix* spp. (Figura 1.16) y de *Populus* spp., seguidos por la fabricación de productos de bajo valor agregado representados por embalajes fruti-hortícolas, mayoritariamente elaborados con madera de *Populus* spp. Por su parte, los productos aserrados de mayor valor agregado están representados principalmente por molduras, tableros de listones y vigas laminadas fabricadas con madera de *Populus* spp., y por muebles fabricados principalmente con especies de *Salix* spp. Por su parte, en la ITM de aserrado de la región de secano, al igual que lo mencionado anteriormente, predominan los productos de primera transformación como tablas, tirantes y tablones, en orden de importancia. A continuación, se encuentran los productos de bajo valor agregado, tales como pallets y embalajes para productos de pesca y fruti-hortícolas, con destino zonal. Entre los productos de mayor valor agregado, se fabrican pisos de *Eucalyptus* spp. y madera para la construcción de *Pinus radiata*.



Figura 1.16. Estructura de vivienda realizada con madera de *Salix spp.*-LIMAD.
Fuente: propia (2017).

El resto de la provincia presenta una producción más homogénea pero en general representada por productos de primera transformación, principalmente tablas, y tirantes en menor proporción. Asimismo, existe una representación de productos de remanufactura de bajo valor agregado, constituidos principalmente por pallets y cajones para productos fruti-hortícolas.

La ITM de fabricación de tableros en la provincia, está representada por una empresa de gran envergadura que elabora tableros de partículas, utilizando como materia prima madera de *Salix spp.*, en mayor proporción, y de *Populus spp.*, en menor proporción, incluyendo también los descartes de aserraderos y debobinadoras; el destino de dicho producto es principalmente para mueblería. Asimismo, se encuentran empresas que realizan el proceso de debobinado, una asociada a la producción de láminas para la fabricación de fósforos y otras asociadas a la producción de láminas y tableros compensados para la fabricación de embalajes fruti-hortícolas, principalmente, y para la industria del mueble en segundo lugar, empleando en todos los casos, fundamentalmente madera de *Populus spp.*

Provincia de Mendoza

La superficie con plantaciones forestales en la provincia es de 6.197,3 ha de macizos y 3.633,9 km de cortinas forestales (MA, 2017). Casi la totalidad de la materia prima rolliza utilizada por los aserraderos es de *Populus spp.*, siendo los clones más difundidos el *Populus x euroamericana cv. Conti 12* y *P. x euroamericana cv. Guardi*.

Del total de aserraderos, la mayor proporción pertenecen a la categoría “micro”, seguidos, en menor proporción por los de categorías “pequeño” y “mediano”, en este último caso, con una única existencia censada (MA, 2017).

En cuanto a la ITM de aserrado, en esta provincia se elaboran fundamentalmente productos de primera transformación como tablas, tablones, listones, alfajías y madera en sándwich; en orden de importancia le proceden los productos de remanufactura de bajo valor agregado representados por cajones, *bins* y *pallets*, luego los productos de valor agregado medio constituidos

por madera aserrada con secado natural o en horno, con o sin cepillado, y machimbres; por último, le siguen en menor proporción, los productos de remanufactura de alto valor agregado compuestos por molduras, madera torneada y carpintería en general; dentro de este último grupo, predomina la fabricación de muebles artesanales, cuya materia prima está mayoritariamente representada por madera de *Prosopis* spp., *Pinus* spp. y *Eucalyptus* spp.

En cuanto a la ITM de tableros, existe una empresa de gran envergadura dedicada a la fabricación de tableros de partículas con destino principal mueblería, para el mercado nacional e internacional. Asimismo, cuenta con empresas dedicadas a la industria del debobinado, en este caso, asociadas a la fabricación de láminas o tableros compensados destinados a la elaboración de envases fruti-hortícolas y en menor medida, al sector del mueble.

Industrias de transformación química

En Argentina existen grandes volúmenes de biomasa de origen forestal sin aprovechar, provenientes tanto de bosques implantados, bosques nativos y de su transformación mecánica. Además de servir para usos estructurales, de construcción y elaboración de distintos productos intermedios o finales, la madera y sus residuos pueden destinarse a otros fines, utilizándose directamente como insumo energético, o transformándola para la producción de dendrocombustibles.

Por un lado, la transformación mecánica de la madera descrita previamente en las distintas regiones del país, genera un volumen apreciable de residuos, que pueden ser aprovechados para la industria celulósica, de tableros, y para usos energéticos. Esta corriente de biomasa se vincula sobre todo a los recursos provenientes de bosques implantados. Se estima que la foresto-industria produce aproximadamente 2 millones tn/año de residuos. Asimismo, en las plantaciones quedan restos de podas, raleos y tala rasa, que se estiman en volúmenes mayores a 5 millones tn/año. A ello, se suma el potencial de manejo sustentable del bosque nativo, que permitiría obtener más de 9 millones de tn/año de biomasa residual. La utilización de este volumen potencial con fines energéticos permitiría producir 4.200 MW de generación térmica y ser una fuente de creación de más de 5.000 empleos. En la actualidad, en una proporción mucho menor, se trata de madera que se utiliza como leña a los fines de cocción y/o calefacción, producción de chips, o se destina a la producción de carbón vegetal (MAGyP, 2019).

Según datos del Anuario de Estadística Forestal, Especies Nativas 2016 (MAyDS, 2018), la extracción anual de leña como tal en Argentina alcanzó 1 millón de toneladas, y de leña para carbón los 2 millones de toneladas. La mayoría de estos volúmenes son extraídos de bosques nativos de nuestro país, en especial del Parque Chaqueño. El uso de la leña como combustible, atiende a las necesidades domésticas de familias que no tienen acceso a otras fuentes de energía para sus actividades de cocción de alimentos, higiene y calefacción (Figura 1.17). También, el uso de leña se verifica en actividades comerciales que utilizan hornos, como por ejemplo, en la panificación, la elaboración de cerámica y ladrillos, secaderos de yerba mate y té. Estas actividades comerciales son muy frecuentes en las provincias que no tienen un acceso garantizado al gas de red.



Figura 1.17. Estufa social argentina de alto rendimiento.
Fuente: Nanami et al. (2014).

La actividad de elaboración de carbón vegetal se asocia principalmente a provincias del norte argentino, predominando Santiago del Estero y Chaco (Figura 1.18). De hecho, el carbón es el principal producto forestal de Santiago del Estero, con una producción que supera las 100.000 tn/año, proveniente de maderas del monte nativo, tales como *Aspidosperma quebracho blanco* (quebracho blanco), *Schinopsis balansae* (quebracho colorado chaqueño) y *Ziziphus mistol* (mistol). Dicha producción abastece tanto el mercado nacional como el internacional. Las exportaciones de carbón vegetal representan el 12% de las exportaciones de productos forestales del país, totalizando unas 52 mil toneladas que equivalen a unos 15 millones de dólares anuales (Comercio Exterior de Productos Forestales, 2018)⁵.

⁵ https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/comercio_exterior_2017_.pdf



Figura 1.18. Elaboración de carbón vegetal con destino de exportación (Chaco).
Fuente: Exportadora Nardelli (2021)⁶.

Algunas provincias argentinas carecen de una red de gas natural, y por ende, deben recurrir a otras fuentes para garantizar la provisión energética. A modo de ejemplo, en una provincia netamente forestal como Misiones, se vienen llevando a cabo proyectos que emplean materiales como chips, viruta y aserrín, y sus derivados densificados (como *pellets*), para la generación eléctrica y térmica (Figura 1.19). El mercado de pellets es uno de los que mayor crecimiento registra en el mercado internacional como sustitución de combustibles fósiles. En el año 2017, el mercado de pellets estaba valuado en 7,67 mil millones de dólares, pronosticando un crecimiento anual del 9,2% hasta el año 2025, que provendrá especialmente de los mercados asiáticos (Corea, Japón) y Canadá (MAGyP, 2019). En este contexto, nuestro país debiera aprovechar la abundancia de materia prima y las ventajas competitivas que presenta para aumentar su producción de biocombustibles densificados, no solo para el uso local sino también con destino a exportación.



Figura 1.19. Pellets de aserrín (Misiones).
Fuente: LIPSIA (2021)⁷.

⁶ <http://www.exportadoranardelli.com/index.php>

⁷ <https://lipsia.com.ar/>

En Argentina, se han desarrollado casos exitosos de uso de pellets en hoteles, comercios y hogares. En Puerto Iguazú (Misiones), la mayoría de los hoteles utilizan calderas en base a pellets. Estas calderas son de alta eficiencia y con sistemas computarizados que optimizan el uso del combustible para generar energía térmica para calefacción y agua caliente (Figura 1.20).



Figura 1.20. Quemador industrial de caldera a base de pellets.
Fuente: LIPSIA (2021)⁸.

Un panorama similar sucede en poblaciones patagónicas, con ciudades que presentan necesidades energéticas reales debido a la combinación del incremento poblacional, las bajas temperaturas y el escaso acceso al gas (de red o envasado). Ello vuelve factible la búsqueda de sistemas alternativos de calefacción y cocción, entre los que se destacan aquellos que se alimentan de insumos como leña, chips o pellets. Para ello, distintas agencias gubernamentales (INTI, INTA, gobiernos provinciales y municipales) son responsables del desarrollo de proyectos que facilitan el acceso a la biomasa y su tecnología de aprovechamiento (Figura 1.21).

⁸ <https://lipsia.com.ar/>



Figura 1.21. Caldera a base de chips (Bariloche, Rio Negro).
Fuente: CIEFAP (2021)⁹.

Actualmente, el país cuenta con alrededor de diez fábricas de *pellets* aunque aún no están trabajando a máxima capacidad. Para el desarrollo del mercado interno se estima que se requiere financiamiento adecuado para el cambio de tecnología (de gas licuado de petróleo-GLP o fuel oil a chips o *pellets*) y principalmente, mayor información hacia los usuarios sobre las ventajas del uso de biomasa como combustible.

El uso de pellets y chips en calderas permite un ahorro sustancial de los costos energéticos (entre 30% y 40%) si se reemplaza GLP o fuel oil, mejorando notablemente la competitividad de las pequeñas y medianas empresas, especialmente aquellas que no tienen acceso a redes de gas natural, o dicho acceso se vuelve muy dificultoso.

En virtud de lo expuesto, el sector forestal es un actor importante en la transición energética global, colaborando en la ampliación de la matriz de energías renovables, lo cual resulta imperativo para crecer con la menor huella de carbono posible.

Consideraciones finales

A nivel nacional, el recurso forestal preponderante, en cuanto a superficie disponible, se corresponde a bosques nativos. Asimismo, el consumo y la representación industrial (productos de la industria de transformación mecánica principalmente, y también la química), es predominantemente asociada a bosques implantados.

El polo foresto-industrial más importante se encuentra en el NEA; dicha región es la más significativa en cuanto a la disponibilidad de plantaciones y entramado industrial, abasteciendo con un vasto volumen de productos de *Pinus* spp. y *Eucalyptus* spp. a los principales centros de consumo de nuestro país, tales como Buenos Aires, Córdoba y Santa Fe. Asimismo, genera una cantidad considerable de residuos foresto-industriales pasibles de aprovechamiento energético.

⁹ <https://www.ciefap.org.ar/>

En términos generales, la ITM se caracteriza por tener escalas de producción relativamente pequeñas, poco tecnificadas, con diferencias marcadas entre regiones. Asimismo, la representación de los productos provenientes de la industria de aserrado, es predominantemente de primera transformación, principalmente asociada a materia prima de bosques cultivados. Por su parte, existe una menor representación de productos de remanufactura de valor agregado medio-alto, principalmente asociado a maderas de bosques nativos, aunque a nivel nacional, el volumen de estos productos es inferior al de los productos provenientes de madera de especies exóticas.

En cuanto a la ITQ orientada a la dendroenergía, nuestro país se encuentra en un estadio incipiente de desarrollo, especialmente en lo que respecta a los biocombustibles más avanzados.

Como desafíos asociados a la industria de transformación mecánica y química, debe destacarse la importancia de revertir la participación de productos de la industria. Esto se traduce en aumentar la participación de productos con mayor valor agregado, la estandarización de medidas y calidades, la certificación de productos y el desarrollo de otros a partir de la incorporación de nuevas tecnologías, como así también, el reemplazo de combustibles de origen fósil por otros provenientes de fuentes renovables.

Referencias

- MA (Ministerio de Agroindustria). (2018). Censo de aserraderos: provincias de Corrientes, Misiones, Chubut, Río Negro y Santiago del Estero. Disponible en: https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/ss_desarrollo_foresto_industrial/censos_inventario/
- MA (Ministerio de Agroindustria). (2017). Censo de aserraderos: provincia de Buenos Aires, Entre Ríos; Jujuy; Mendoza; Neuquén; Salta; Tierra del Fuego. Disponible en: https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/ss_desarrollo_foresto_industrial/censos_inventario/
- MA (Ministerio de Agroindustria). (2017). Inventario plantaciones forestales: bajo riego (Cuyo). Disponible en: https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/ss_desarrollo_foresto_industrial/censos_inventario/
- MA (Ministerio de Agroindustria). (2015). Informe nacional del relevamiento censal de aserraderos (informe completo). Disponible en: https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/ss_desarrollo_foresto_industrial/censos_inventario/
- MAGyP (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación). (2019). Plan Estratégico Forestal y Foresto-Industrial 2030. Programa de Sustentabilidad y Competitividad Forestal. Disponible en: <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/sycf/publicacion-forestales-11-diciembre-2019.pdf>
- MAYDS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación). (2018). Anuario de Estadística Forestal, Especies Nativas 2016. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2016_-_anuario_de_estadistica_forestal_de_especies_nativas.pdf
- Nanami, A.; Lambert, A.; Tejerina, D.; Dabbah, F.; Ogara, M.; Tedesco, M.; Hugón, N.; Romero, P.; Rotondaro, R.; Illieff, S. (2014). *SARA Estufa social argentina de alto rendimiento: Manual*

para autoconstructores (1ª Ed.). San Martín, Buenos Aires Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.

Sharry, S. 2020. Situación de los recursos forestales en la Argentina. En Galarco & Ramilo (Coord.), *Plantaciones forestales en Argentina. Fundamentos técnicos y metodologías para la realización de forestaciones en diferentes regiones* (9-37). La Plata: Edulp.

CAPÍTULO 2

Planificación de un aserradero: playa de trozas y proceso productivo

Carla Taraborelli y Gabriel D. Keil

Consideraciones generales

El aprovechamiento de los bosques, en particular de los bosques implantados, tiene como objetivo principal la producción de madera aserrada. De esta manera, los rollizos extraídos de dichos bosques son procesados en aserraderos donde se obtienen los productos finales de mercado o los insumos para otras industrias. En términos generales, se entiende por **madera aserrada** a toda pieza prismática, de diferentes escuadrías y calidades, cortada longitudinalmente por medio de sierras manuales o mecánicas (IRAM 9502, 1957). Este concepto será ampliado en los Capítulos 3 y 5.

La madera aserrada y los productos derivados tales como machimbres, molduras, tableros de listones y vigas laminadas, entre otros, juegan un papel importante en la mitigación del cambio climático, ya que son capaces de almacenar carbono a largo plazo, presentando una oportunidad más viable en el sector de la construcción a nivel mundial, principal destino final de la madera aserrada. Además, los productos secundarios obtenidos durante los procesos de producción (corteza, costaneros, astillas, aserrín, virutas), se emplean como materia prima para la elaboración de otros productos con diversos fines, tales como energéticos, celulósicos, fabricación de tableros, entre otros, pudiendo en consecuencia, sustituir en la mayoría de los casos, a otras materias primas con mayor huella de carbono (Packalen *et al.*, 2017).

De esta manera, la organización de la industria del aserrado debe contemplar una multiplicidad de factores. Entre ellos, se destaca la maximización del aprovechamiento de la materia prima proveniente de recursos naturales renovables y su transformación en productos de mayor valor agregado, conceptos vinculados a la **bioeconomía** (Loray, 2015; Näyhä, 2019). Por otro lado, se busca la minimización de las pérdidas y la atención a las demandas de los mercados nacionales e internacionales manteniendo los productos, componentes y materiales en su mayor utilidad y valor, paradigmas relacionados a la **economía circular** (Näyhä, 2019; Ellen MacArthur Foundation, 2015). Ambos conceptos deberían plantearse en conjunto a fin de garantizar que los recursos se utilicen de manera más productiva y eficiente (European Environment Agency, 2018).

De acuerdo con esto, a continuación se desarrollarán los diversos factores del proceso productivo de un aserradero.

Factores de la industria de aserrado

Tomando en cuenta el análisis realizado por Husso & Nybakk (2010) y Packalen *et al.*, (2017) a continuación se desarrollan los factores externos e internos inherentes a la industria de aserrado.

Factores externos

Factor social y de consumo: se observa a nivel global un aumento de la urbanización; específicamente, en Argentina el nivel de déficit habitacional crece y es necesaria una solución rápida y de calidad. La utilización de la madera como material de construcción se está posicionando competitivamente frente a otros materiales, debido a aspectos energéticos, ambientales, estéticos y de diseño. De esta manera, la demanda de productos de madera irá aumentando y por lo tanto, las industrias deberán posicionarse a un nivel competitivo de mercado que pueda satisfacer las necesidades planteadas.

Factor tecnológico: existen avances tecnológicos que permiten nuevos escenarios en cuanto al consumo energético, la facilidad y rapidez de producción, la variabilidad de productos, la minimización del impacto ambiental, entre otros, con respecto a las tecnologías más antiguas.

Factor económico-financiero: el sector foresto-industrial nacional es relativamente pequeño en relación a otros sectores industriales. La industria de aserrado posee mayor cantidad de pequeñas y medianas empresas, con problemas de financiamiento y de informalidad, y pocas industrias grandes generalmente integradas con capitales que pueden afrontar desequilibrios económicos y financieros.

Las oportunidades de este sector pertenecen a mercados que comercializan productos con precios internacionales determinados denominados *commodities*, como es el caso de la madera aserrada de coníferas (*Pinus spp.*). Mientras que la materia prima proveniente de especies latifoliadas encuentran “nichos de mercado” donde la exclusividad del producto permite cierta flexibilidad en los precios finales, por lo que existe un proceso de aserrado competitivo, no necesariamente ligado a la productividad.

Factor político: le otorga el marco general a los factores mencionados anteriormente, ya que, de acuerdo a las políticas implementadas a nivel nacional y/o internacional, surgirán los lineamientos a seguir. En el país, existen pocas industrias de gran escala y con capacidad de abastecer al mercado. A su vez, la masiva importación de productos terminados y la exportación de materia prima en bruto (rollizos) no favorecen al desarrollo local ya que, las industrias de transformación que le otorgan valor agregado a la materia prima y que generan recursos económicos y emplean mano de obra, tienen un desarrollo incipiente.

Factores internos

Materia prima: en la planificación de un aserradero, este factor tiene una relación directa con los productos finales y conlleva decisiones como la localización, maquinaria, procesamiento-remanufactura y requerimientos del mercado.

En términos generales, a nivel nacional existe una sustitución permanente de maderas nativas por maderas de especies implantadas, dados los altos costos de aprovechamiento, los problemas sanitarios, la poca homogeneidad de las trozas, los bajos rendimientos y productividades, los elevados costos de aserrado y, por último, y no menos importante, las fuertes presiones ambientales que obligan a los gobiernos a tomar medidas cada vez más sustentables.

En cuanto a las especies implantadas, en Argentina existe un reemplazo de trozas de grandes diámetros por trozas de diámetros medios y pequeños, debido a la reducción de los turnos de corta. Además, el incremento en el costo de la materia prima, ha hecho que trozas de menor diámetro que anteriormente tenían como destino las industrias del triturado (pulpas, bioenergía, tableros de partículas y fibras), hoy se asierren con líneas de producción diseñadas para este tipo de trozas.

En relación a la disponibilidad de materia prima en cercanías de la industria, es recomendable que sean especies con valor comercial, conocidas y con mercados insatisfechos; se aconseja solo un pequeño porcentaje de productos de una nueva especie para la incorporación gradual al mercado.

Un aspecto importante, es que la industria incorpore superficie de monte como **área de seguridad**; en establecimientos medianos-grandes y grandes se recomienda un área que cubra el 30% de la producción anual para ser procesada en circunstancias excepcionales de manera de no interrumpir la producción por falta de provisión de materia prima.

De acuerdo a la maquinaria disponible para aserrar, sobre todo la sierra principal y su sistema de avance (a desarrollarse en el Capítulo 3), se debe analizar la existencia de trozas de diámetros y largos aserrables en cantidad y calidad, de acuerdo al objetivo de producción establecido. Para ello, se debe tener en cuenta la necesidad anual de trozas para abastecer la planta de aserrado en el presente, previendo futuras ampliaciones. Este dato se obtiene a partir de la producción anual estimada para el aserradero a instalar y del rendimiento probable de madera aserrada con respecto al volumen de trozas procesado.

Mercados: es vital considerar sus exigencias y conocer cuáles son los productos de mayor demanda. En este sentido, también existe un paulatino reemplazo de piezas enteras por piezas formadas a partir del encolado de piezas más pequeñas. A nivel nacional, el mayor mercado se encuentra en el eje Buenos Aires-Rosario-Córdoba, área de mayor concentración de la población del país.

Con el objetivo de dar cumplimiento a las exigencias del mercado, existen diferentes tipos de certificación como FSC® (*Forest Stewardship Council*) y CERFOAR (Sistema Argentino de Certificación Forestal), que tienen como propósito certificar los procesos y productos, otorgando información clara sobre la trazabilidad de la materia prima empleada en el producto final.

Transporte: se debe asegurar un abastecimiento sostenible de la materia prima en el tiempo y a una distancia razonable del aserradero. En términos generales, la distancia a la que se debe encontrar la materia prima puede variar desde 30 a 60 km, siendo una distancia máxima aceptable hasta los 150 km. Esto dependerá de la región donde se encuentre instalado el aserradero, ya que no son las mismas distancias en la región del NEA que en la región Patagónica. El transporte de materia prima hacia el aserradero es el más crítico, ya que para abastecer de trozas a la industria se recorren distancias medias-cortas en caminos rurales, los cuales deben soportar la capacidad de carga de los camiones con trozas con alto contenido de humedad. En cambio, para transportar los productos a los centros de consumo y/o comercialización se deben recorrer generalmente grandes distancias, en mejores condiciones, influyendo directamente en el valor final del producto.

En términos generales, a nivel nacional predomina el transporte terrestre a través de camiones, y en los últimos años, se ha incorporado en algunas regiones, la utilización de bitrenes¹⁰, que al poseer gran capacidad de carga reduce los costos. El transporte fluvial de trozas se realiza en la zona del Delta del Río Paraná para aserraderos de Tigre, San Fernando y Zárate; sin embargo, no se emplea en el transporte de madera aserrada o de productos remanufacturados.

Recursos humanos: la industria de aserrado requiere cierto grado de calificación para tareas propias del sector, como las que realiza el operador de la sierra principal, el técnico afilador, el personal encargado de la clasificación y secado de la madera aserrada, entre otros. Es recomendable que la planta de aserrado pueda contar con personal capacitado y/o experimentado, en condiciones de estabilidad laboral y con capacitaciones permanentes, con el fin de actualizar los conocimientos sobre las tecnologías y la seguridad en el trabajo.

El personal de la industria debe contar con tiempos de descanso y seguridad. El tiempo de descanso en este tipo de actividades es esencial ya que se trabaja con equipos de alto riesgo y el cansancio constituye un factor de peligro.

Energía: su disponibilidad es cada vez más limitada y con costos progresivamente elevados. Las máquinas de los aserraderos permanentes poseen motores individuales con energía eléctrica, mientras que los aserraderos portátiles consumen combustibles fósiles, generalmente gasoil.

Las calderas se utilizan fundamentalmente para abastecer los grandes secaderos de madera aserrada; pueden funcionar a gas, con limitaciones de disponibilidad durante los meses invernales, con gasoil o con residuos del mismo aserrado.

El costo de los diversos procedimientos de aserrado depende en gran parte de la reutilización de los productos secundarios. El aserrín se emplea como combustible en calderas, mientras que los costaneros y recortes de trozas descortezadas se astillan para la fabricación de pasta o de tableros de partículas o de fibras.

El desafío más importante en cuanto a lograr una economía sustentable, es la reutilización de los productos secundarios de aserrado para diversos fines, entre ellos, el autoabastecimiento de

¹⁰ Bitren: formación basada en un camión (unidad tractora) con al menos dos remolques articulados entre sí, mediante un sistema de enganche. La longitud y peso de los bitrenes es variable según el país, encontrándose con rangos entre 19-30 m y 53-75 toneladas brutas, respectivamente.

energía, es decir, el reemplazo de energía fósil a energía renovable. Estos conceptos serán ampliados en el Capítulo 6.

Aspectos de optimización de la industria

Con el objetivo de lograr la mayor competitividad de la industria, el funcionamiento del aserradero debe estar basado en la producción de madera bajo los siguientes parámetros (Fronius, 1990; INFOR, 1989):

- Mayor rendimiento (%)
- Mayor productividad (pie²/turno)
- Mayor eficiencia (pie²/operario/turno)
- Menor costo (\$)
- Mejor calidad

Si bien en el Capítulo 4 se profundizará el tema, en esta instancia se destacan los principales parámetros del aserrado:

Rendimiento: es la producción de madera aserrada a partir del volumen de trozas empleado en la transformación; cuanto mayor sea este parámetro, mejor será considerado el proceso de aserrado.

Productividad: se refiere al mayor volumen de madera aserrada producida por unidad de tiempo; en el proceso de aserrado se debe tender a generar la máxima productividad posible.

Eficiencia: involucra a la mano de obra necesaria para la producción de un volumen de madera aserrada por unidad de tiempo.

Costo: término referenciado al desembolso económico necesario para la producción de madera aserrada, considerando a cada uno de los actores participantes del proceso.

Calidad: se refiere a un conjunto de características mínimas que debe presentar la madera aserrada respecto a distintas variables, tales como dimensiones, escuadrado, calidad estructural y estética, entre otras.

Aserraderos portátiles y permanentes

Los aserraderos pueden clasificarse en portátiles y permanente, cuyas características comparativas se detallan en la Tabla 2.1.

FACTOR	ASERRADERO PORTÁTIL	ASERRADERO PERMANENTE
Período de funcionamiento en un mismo sitio	Meses hasta un año.	Décadas-Posibilidad de futuras ampliaciones.
Planificación	Sencilla y práctica.	Más sofisticada su operación, movimiento, almacenaje e inspección.
Acondicionamiento del terreno	Acondicionamiento mínimo: aclareos y terrenos no inundables y nivelados (emparejados).	Acondicionamiento mayor: consolidación y nivelación en exterior, y piso de cemento consolidado en interior.
Anclaje de los equipos	No requiere: está apoyado sobre el terreno o carros transportables.	Requiere: los equipos están fijos través de fundaciones y anclajes.
Ubicación geográfica	En el lugar de extracción de trozas.	En centros urbanos cercanos a la materia prima.
Energía	Consumen combustible fósil, generalmente gasoil.	Alto consumo de energía eléctrica.
Relación potencia motriz - equipo	Depende de una única unidad motriz central con reductores de velocidad, poleas, coronas y piñones.	Cada máquina o equipo tiene un motor eléctrico individual.
Cantidad de máquinas y equipos	Máximo de 3 máquinas: sierra principal, canteadora y despuntadora.	Una máquina para cada función: sierra principal, desdobladora, canteadora, despuntadora, re-aprovechadora de costaneros, entre otras.
Cantidad de operarios	3-5 operarios	5-10 operarios en aserraderos chicos; 40-80 en aserraderos medianos; >100 en aserraderos grandes.
Preparación de las trozas	Recepción y procesamiento diario. No requiere espacio significativo para el acopio de trozas.	Procesamiento ininterrumpido durante el año. Requiere de espacio suficiente para acopio de trozas.
Grado de transformación	Transformación parcial: primer corte con producción de piezas de gran escuadría (en general).	Transformación total: remanufactura con producción de productos de mayor valor agregado.
Productividad	Baja (inferior a la menor productividad de aserraderos permanentes pequeños)	Baja: hasta 8.000 pie ² /turno (aserraderos chicos y pequeños); Media: 8.000 a 40.000 pie ² /turno (aserraderos medianos); Alta: 40.000 a 250.000 pie ² /turno (aserraderos grandes).

Tabla 2.1. Factores diferenciales en aserraderos portátiles y permanentes.

Fuente: propia (2020).

En muchas ocasiones, el aserradero portátil (Figura 2.1) puede trabajar en conjunto con el aserradero permanente (Figura 2.2), realizando el primer corte en el monte con aserradero portátil y luego el reaserrado, en planta industrial, con aserradero permanente.



*Figura 2.1. Aserradero portátil. San Martín de los Andes (Neuquén).
Fuente: propia (viaje de estudios Ing. Ftal., 2008).*



*Figura 2.2. Aserradero permanente-CTM.
Fuente: propia (2018).*

Principales características de los aserraderos permanentes

Tal como se mencionó en la Tabla 2.1, el aserradero portátil generalmente se compone de una sola máquina de poca complejidad en el proceso de aserrado. En contraposición, el aserradero permanente presenta una mayor complejidad en su proceso productivo, en la distribución de espacios y en los equipos necesarios para realizar la transformación

mecánica de la troza. Por tal motivo, a continuación se desarrollan los distintos aspectos a considerar en un aserradero de estas características.

Distribución de las máquinas y los equipos en un aserradero

El diagrama de flujo, también denominado con el término *lay out*, literalmente traducido como “configuración”, se define en forma gráfica como la elección compositiva y asociativa de los elementos específicos (máquinas y equipos) dentro de un espacio determinado, para que su conformación espacial maximice su eficacia durante el proceso de aserrado (Rossi, 2006).

En el diseño de la **distribución de las máquinas y equipos** en la planta de aserrado, se debe tener en cuenta la disposición de las máquinas con el fin de propiciar la mayor eficiencia de acuerdo al producto que se quiera lograr, optimizando la velocidad de flujo de los materiales en las distintas fases de transformación. Con el objetivo de mejorar dicho flujo y la seguridad del personal, es recomendable una adecuada **distribución de los espacios productivos**. De este modo, quedarían delimitadas las áreas que conforman el aserradero, las cuales dependerán del tipo de establecimiento. En términos generales, en una planta de aserrado tipo, se encuentran 5 sectores de trabajo bien diferenciados: playa de trozas, sector de aserrado propiamente dicho, playa de secado de la madera aserrada, sector para el manejo de productos secundarios del aserrado como aserrín, costaneros, chips, virutas, despuntes, cantos, corteza y tablas de desecho, y sector de remanufactura donde se le agrega valor a los productos de aserrado de mayor calidad, produciendo por ejemplo, tablas cepilladas, molduras, machimbres, tableros de listones, vigas laminadas, tableros CLT, entre los de mayor relevancia.

En la Figura 2.3, se muestra la configuración del aserradero del CTM, un establecimiento de mediana escala. Allí se observa el sector para ingreso y salida de camiones (1), el espacio para la playa de trozas (2), el sector de la administración (3), la nave que alberga a la línea de aserrado y al taller de afilado (4), la cámara de secado (5), el sector de secado bajo tinglado (6), el sector de secado al aire libre (7), el taller de remanufactura (8), el galpón de almacenamiento de productos terminados (9) y el sector para acopio de chips (10).



Figura 2.3. Distribución de los espacios de producción-CTM.
Fuente: CTM (2021).

Principales máquinas para aserrar

En el sector 4 de la Figura 2.3 se ubican las **máquinas principales**, que son aquellas que realizan los procesos de corte o aserrados iniciales de la madera. Estas máquinas incluyen: **sierra principal** para hacer el primer corte de la troza, **sierra desdobladora** para reaserrar las piezas provenientes de la sierra principal, **sierra canteadora** para dar el ancho a la pieza aserrada, y **sierra despuntadora** para dar el largo a la misma pieza, pudiendo haber sierras que se encargan de reaprovechar los costaneros gruesos que se obtienen en la sierra principal. En el Capítulo 3 se realizará una descripción más detallada sobre estos aspectos.

Máquinas y equipos auxiliares

En el sector 4 de la Figura 2.3 también se ubican las **máquinas y equipos auxiliares**, las cuales, si bien no realizan cortes en la madera, aportan para que el proceso se realice en forma integral. En un aserradero mediano o grande, se pueden encontrar los siguientes equipos auxiliares al aserrado de la madera: descortezadora, sistemas de volteo y giro de trozas, cintas transportadoras, astilladora, sistema de baño anti-mancha, equipos para el mantenimiento de los elementos de corte, entre otros. En el Capítulo 3 se realizará una descripción más detallada sobre estos equipos.

Diagrama de flujo de un aserradero tipo

En la Figura 2.4 se presenta el esquema de trabajo de un aserradero tipo, que incluye además, los procesos de secado y remanufactura, y abarca desde el almacenamiento de la materia prima hasta la entrega de los productos terminados. El diagrama de flujo variará según cada aserradero.

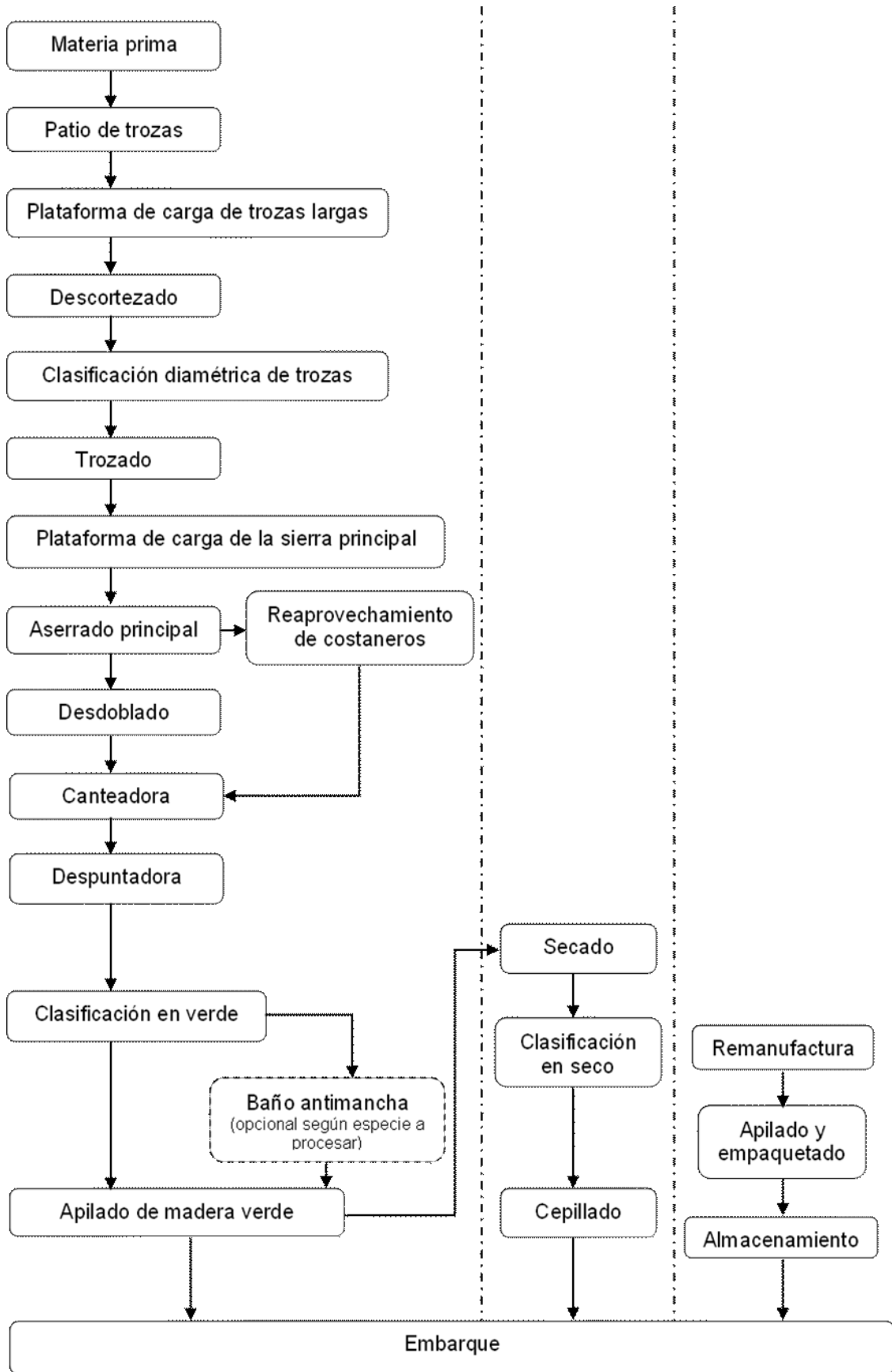


Figura 2.4. Diagrama de flujo de un aserradero tipo.
Fuente: propia (2020).

Específicamente el diagrama de flujo del aserradero del CTM no cuenta con descortezadora, plataforma de carga de trozas largas, tronzadora, ni clasificador de trozas. En cuanto a los equipos de aserrado, el CTM no cuenta con sierra para reaprovechamiento de costaneros ni desdobladora, si bien la canteadora se puede usar como desdobladora para piezas de hasta 3" de altura. Asimismo, cuenta con un secadero con capacidad para 15 m³ de madera aserrada, y con un taller de remanufactura cuyos detalles se desarrollarán en el Capítulo 5. El proceso se completa con el movimiento subterráneo a través de cintas, de productos secundarios clasificados por granulometría, con la salida del aserrín hacia un silo, mientras que los productos de mayor dimensión pasan por la chipeadora luego de la cual, los chips se almacenan en forma elevada en un segundo silo para facilitar la carga del transporte.

Playa de trozas

Dada la importancia de la materia prima en este tipo de industrias, la planificación de la playa de trozas toma relevancia significativa. La superficie otorgada para ello es generalmente mayor que para el resto de las actividades dentro del predio, ya que la producción debe ser continua y requiere contar con suficiente stock de materia prima para abastecer el aserradero. Asimismo, con el fin de evitar pérdidas de productividad y rendimiento, la playa de trozas debe estar correctamente diagramada en relación al producto final a obtener.

Las principales actividades que se desarrollan en la playa de troza son las siguientes:

- Abastecimiento
- Almacenamiento
- Clasificación
- Protección
- Cubicación
- Manejo
- Descortezado
- Tronzado

Abastecimiento de trozas

El abastecimiento constituye la recepción de la materia prima en la playa de trozas, las cuales son abastecidas a la planta de aserrado por medio de camiones. Éstos pueden tener un sistema de descarga propio, con cabezales para mover las trozas desde el transporte a la pila o, en caso de no contar con dicho cabezal, debe preverse desde el aserradero, el equipo para realizar esta tarea (Figura 2.5).



Figura 2.5. Abastecimiento con cabezales de trozas de *Pinus ponderosa* (Abra Ancha, Neuquén).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2008).

Almacenamiento de trozas

El objetivo del almacenamiento es mantener un volumen suficiente de trozas para que el aserradero funcione ininterrumpidamente. La materia prima debe ser almacenada de forma tal que permita la utilización de las trozas más antiguas primero, ya que tienden a perder humedad y calidad por la aparición de varios defectos (Figura 2.6).



Figura 2.6. Almacenamiento de trozas de *Eucalyptus grandis*. (Ubajay, Entre Ríos).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2013).

El diseño de apilado de la materia prima depende de la tecnología disponible para tal fin. Para pilas de mayor altura, se emplean plumas fijas en el terreno, o móviles con ruedas sobre rieles; para pilas de altura media se emplean cargadores frontales forestales; para pilas de menor altura se emplean tractores agrícolas adaptados para la función.

El diseño del espacio de almacenamiento debe contemplar un camino perimetral cortafuego y calles de distintas jerarquías para circular entre las pilas.

La playa de trozas se conecta directamente con el sector de aserrado, por lo tanto las pilas deben estar ubicadas alejadas del lugar de aserrado para evitar incendios que puedan originarse en el sector de procesamiento, como así también pérdidas de tiempo por obstrucciones, pero lo suficientemente cerca para minimizar el transporte desde la pila a la plataforma de carga de la sierra principal.

Para el cálculo de la superficie de almacenamiento se pueden emplear distintas metodologías de trabajo, dependiendo de la información previa con que se cuenta.

El Instituto Forestal de Chile (INFOR, 1989) propone la siguiente fórmula de cálculo (Fórmula 2.1):

$$S \text{ (m}^2\text{)} = \frac{Q}{H \times K_1 \times K_2 \times K_3} \quad (2.1)$$

Donde: S: superficie de almacenamiento, en m²; Q: volumen de trozas a almacenar (dependiente de la productividad y el rendimiento), en m³; H: altura media de las pilas, en m; K₁: coeficiente de utilización de la superficie (0,5-0,7); K₂: coeficiente de densidad de apilado (0,4-0,6); K₃: coeficiente de utilización de la altura (0,5-0,8), adimensionales.

El volumen de trozas a almacenar dependerá del nivel de producción del aserradero y del rendimiento de las trozas en madera aserrada. La altura de las pilas dependerá del/los equipo/s disponible/s para el apilado, ya que cada equipo tiene una altura de trabajo característico. Los coeficientes K₁, K₂ y K₃ son empíricos, obtenidos en trabajos con trozas de *Pinus radiata* de la industria chilena.

En FAO (1982), se propone la siguiente metodología de cálculo, un poco más sencilla y menos específica que la anterior (Fórmula 2.2):

$$S_r \text{ (m}^2\text{)} = \frac{Q}{H \times d} \times 4 \quad (2.2)$$

Donde: S_r: superficie de almacenamiento, en m²; Q: volumen de trozas a almacenar, en m³; H: altura media de las pilas, en m; d: coeficiente de densidad de apilado (0,4-0,6), adimensional.

Esta fórmula incluye el espacio requerido por las pilas de madera y la superficie requerida para los caminos cortafuegos e internos. La densidad de apilado surge del cociente entre el volumen real de trozas y el volumen total de las pilas. Se multiplica por 4 para considerar la planificación de caminos cortafuego e internos entre filas. Es una fórmula sencilla y de aplicación aceptable para los ejemplos nacionales.

La superficie de emplazamiento total de una planta de aserrado (Fórmula 2.3) se podrá calcular sumando la superficie de almacenamiento de trozas; la superficie de edificaciones, que son los metros cuadrados construidos en galpones, pañoles, vestuarios, baños, oficinas, secaderos y otras necesarias para el normal trabajo de la planta industrial; y la superficie requerida para el secado al aire (natural) de parte o la totalidad de la producción.

$$S_t \text{ (m}^2\text{)} = S_r + S_c + S_a \quad (2.3)$$

Donde: S_t: superficie de emplazamiento total del aserradero, en m²; S_r: superficie de la playa de trozas, en m²; S_c: superficie de construcciones en m²; S_a: superficie de secado natural de madera aserrada, en m².

La superficie de secado al aire o estacionamiento de madera aserrada se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$S_a \text{ (m}^2\text{)} = \frac{Q}{H \times d} \times 6 \quad (2.4)$$

Donde: S_a: superficie de secado, en m²; Q: volumen de madera aserrada a secar, en m³; H: altura media de las pilas, en m; d: coeficiente de densidad de apilado de madera aserrada (0,6-0,8), adimensional.

El volumen de madera aserrada a secar dependerá del nivel de producción del aserradero y del tiempo requerido para secar la madera. La altura de las pilas dependerá del/los equipo/s disponible/s para el apilado, y el coeficiente de apilado surge del cociente entre el volumen real de la madera aserrada y el volumen total de la pila, relacionado principalmente al espesor de los separadores. Se multiplica por 6 para considerar la planificación de caminos inter-nos entre filas.

Clasificación de trozas

Con el objetivo de mantener un flujo de producción y evitar perder eficiencia y rendimiento, se sugiere que la playa de trozas se encuentre ordenada. Por este motivo, se clasifica y ordena la madera con el empleo de cargadores frontales en distintas pilas. La clasificación se realiza según especie, diámetro menor, estado sanitario y presencia de defectos (Figuras 2.7 y 2.8).



Figura 2.7. Trozas clasificadas e identificadas de *Nothofagus pumilio* (Tolhuin, Tierra del Fuego). Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2017).



Figura 2.8. Trozas sin clasificación diamétrica de *Eucalyptus grandis* (Virasoro, Corrientes). Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2005).

En aserraderos de especies nativas del NEA y del NOA, es muy común la clasificación y almacenamiento de las trozas en pilas separadas por especie.

En aserraderos medianos-grandes es habitual encontrar un clasificador mecánico de trozas que escanea la materia prima (por diámetro) a medida que va circulando por una cadena. En el trayecto cuenta con desviadores o pateadores que localizan en boxes las trozas de igual rango diamétrico. Luego, los cargadores frontales trasladan las trozas clasificadas a la plataforma de carga de la sierra principal, acorde a los rangos diamétricos necesarios según el plan de trabajo del aserradero y el producto final requerido.

La clasificación más importante y conveniente de realizar es la clasificación diamétrica en 2 o 3 categorías, para uniformar el proceso de aserrado. Lo recomendable es realizar esta clasificación durante el aprovechamiento en el monte, ya que el espacio para realizarlo es mucho mayor, y sobre todo, en los casos donde la industria no cuenta con equipo de clasificación mecánica de trozas.

En aserraderos que están provistos de descortezador mecánico, el clasificador de rollizos se ubica posteriormente al equipo descortezador, pero en la misma línea de trabajo.

A su vez, es recomendable clasificar por estado sanitario y defectos, para evitar costos altos de producción en trozas de bajo rendimiento por presencia de anomalías. Si el volumen de madera a producir y su costo lo justifican, las trozas con defectos deberán aserrarse en períodos de menor demanda, ya que su tiempo de procesamiento afecta la productividad.

Protección de trozas

El objetivo de esta etapa es prevenir los daños que se puedan originar por los insectos que generalmente se alojan debajo de la corteza y/o por los hongos, que pueden manchar o destruir parcial o totalmente la troza. Asimismo, mediante esta etapa se trata de evitar la desecación brusca que puede originar grietas y rajaduras. Para impedir que el sol incida en forma directa sobre las cabezas de las trozas, las mismas se pueden pintar con productos hidrófugos, proteger con barreras físicas como nylon, madera, o generar sombra con cualquier material disponible.

Del mismo modo, la aspersión de las trozas (Figura 2.9) es una de las prácticas más recomendable para realizar esta etapa de protección, cuyos beneficios son los siguientes:

- Evita o disminuye la aparición de rajaduras de cabeza, y de grietas de cabeza y de superficie.
- Evita el ataque de hongos manchadores y xilófagos al quitar la disponibilidad de oxígeno.
- Previene incendios o ayuda a controlarlos más rápidamente.
- Favorece el descortezado al hidratar las células del cambium.
- Acondiciona la madera para el aserrado principal, disminuyendo la resistencia al corte en trozas demasiado secas.



Figura 2.9. Protección de trozas por aspersión de *Eucalyptus grandis* (Virasoro, Corrientes).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2003).

Cubicación de trozas

En la organización de la playa de trozas, la cubicación tiene tres objetivos: el uso en transacciones comerciales, la obtención de inventarios actualizados y la determinación del rendimiento en aserrado.

Los métodos que se emplean en la cubicación de trozas son:

- Indirecto
- Scanner
- Manual

El **método indirecto** se realiza a través del pesaje de las trozas. Si bien es un método de uso difundido en la industria local, presenta una desventaja fundamental que es la variación del peso

con el contenido de humedad de la madera, que varía con la época del año, el tiempo transcurrido entre apeo y traslado a playa, la especie, entre otros.

Los **scanners** son equipos complementarios más precisos y modernos que pueden estar colocados en el equipo descortezador o en la sierra principal, para determinar el volumen de las trozas.

La **metodología manual** consiste en la medición de los diámetros en punta fina y punta gruesa, así como su longitud, aplicando distintas fórmulas estandarizadas.

En Argentina, la más utilizada es la fórmula de Smalian, tanto en su versión original (Fórmula 2.5) como en su versión simplificada (Fórmula 2.6).

$$V_{\text{ssc}} \text{ (m}^3\text{)} = \frac{a + A}{2} \times L \quad (2.5)$$

$$V_{\text{ssc}} \text{ (m}^3\text{)} = \frac{0,7851 (d^2 + D^2)}{2} \times L \quad (2.6)$$

Donde: V_{ssc} : volumen sólido sin corteza, en m^3 ; a : área en punta fina, en m^2 ; A : área en punta gruesa, en m^2 ; L : longitud de la troza, en m ; d : diámetro en punta fina, en m ; D : diámetro en punta gruesa, en m .

Las fórmulas para cubicación de trozas EFA (Empresa Forestal Arauco), desarrolladas en Chile para cubicar trozas de *Pinus radiata* principalmente, pero factible de ser usadas en Argentina para *P. elliotii* y *P. taeda*, diferencia dos largos de trozas (INFOR, 1989) (Fórmula 2.7). Dicha fórmula es para trozas de largos menores a 8 metros, aplicable a la industria del aserrado:

$$V_{\text{ssc}} \text{ (m}^3\text{)} = -0,01819 + 0,0093 \times L - 0,0003 D^2 + 0,0009 D^2 \times L \quad (2.7)$$

Donde: V_{ssc} : volumen sólido sin corteza, en m^3 ; D : diámetro máximo del extremo menor aproximado al par inferior, en m ; L : longitud agregándole 0,1 m de sobredimensión, en m .

Las fórmulas para cubicación de trozas JAS (*Japanese Agricultural Standards*) se plantean para dos largos de trozas, siendo la de uso más generalizado en aserrado y exportación de rollizos, aquella recomendada para largos menores a 6 metros (Fórmula 2.8).

$$V_{\text{ssc}} \text{ (m}^3\text{)} = D^2 \times L \times 10^{-4} \quad (2.8)$$

Donde: V_{ssc} : volumen sólido sin corteza, en m^3 ; D : diámetro menor aproximado al par inferior, en m ; L : longitud aproximada a los 20 cm inmediatos inferiores, en m .

Las metodologías de cálculo mencionadas tienen sus respectivas tablas de doble entrada donde, en la primera columna se señala el diámetro menor de la troza en centímetro, y en las columnas sucesivas se encuentran distintos largos de trozas en metro, localizándose en el cuerpo de la tabla el valor del volumen de la troza en metros cúbicos sólidos sin corteza para cada par de valores de diámetro y longitud (Tabla 2.2).

Diámetro menor (cm)	SMALIAN		EFA		JAS	
	Largo (m)		Largo (m)		Largo (m)	
	4	6	4	6	4	6
10	0,03167	0,04750	0,05722	0,09569	0,04000	0,07260
12	0,04560	0,06840	0,07362	0,12083	0,05760	0,10140
14	0,06207	0,09310	0,09300	0,15053	0,07840	0,10500
16	0,08107	0,12160	0,11537	0,18481	0,10240	0,17340
18	0,10260	0,15390	0,14072	0,22366	0,12960	0,21660
20	0,12667	0,19000	0,16904	0,26708	0,16000	0,26460
22	0,15327	0,22990	0,20035	0,31508	0,19360	0,31740
24	0,18240	0,27361	0,23464	0,36764	0,23040	0,37500
26	0,21407	0,32111	0,27192	0,42477	0,27040	0,43740
28	0,24827	0,37241	0,31217	0,48647	0,31360	0,50460
30	0,28501	0,42751	0,35541	0,55275	0,36000	0,57660
32	0,32427	0,48641	0,40163	0,62359	0,40960	0,65340
34	0,36607	0,54911	0,45083	0,69901	0,46240	0,73500
36	0,41041	0,61561	0,50302	0,77899	0,51840	0,82140
38	0,45728	0,68591	0,55818	0,86355	0,57760	0,91260
40	0,50668	0,76001	0,61633	0,95267	0,64000	1,00860
42	0,55861	0,83792	0,67746	1,04637	0,70560	1,10940
44	0,61308	0,91962	0,74157	1,14464	0,77440	1,21500
46	0,67008	1,00512	0,80866	1,24748	0,84640	1,32540
48	0,72961	1,09442	0,87874	1,35489	0,92160	1,44060
50	0,79168	1,18752	0,95179	1,46687	1,00000	1,56060
52	0,85628	1,28442	1,02783	1,58342	1,08160	1,68540
54	0,92342	1,38513	1,10685	1,70454	1,16640	1,81500
56	0,99309	1,48963	1,18885	1,83023	1,25440	1,94940
58	1,06529	1,59793	1,27384	1,96049	1,34560	2,08860
60	1,14002	1,71003	1,36180	2,09533	1,44000	2,23260

Tabla 2.2. Volumen sólido sin corteza para cada fórmula de cálculo.

Fuente: INFOR (1989).

Manejo de trozas

El objetivo de esta actividad es permitir la descarga de la madera, movilizarla dentro de la playa de trozas y trasladarla desde las pilas a la plataforma de carga del descortezador o de la sierra principal.

Los equipos que se emplean para esta actividad pueden ser:

- Plataforma inclinada: estructura por la cual se trasladan las trozas por gravedad a la plataforma de carga de la sierra principal.
- Grúas móviles sobre camiones o tractores: equipos que permiten la carga o descarga de las trozas desde el vehículo de transporte que llega a la playa de trozas.
- Grúas móviles sobre rieles: equipos de gran altura que tienen un desplazamiento horizontal.
- Grúa fija o estacionaria sobre una torre: equipos de gran altura sin desplazamiento horizontal.
- Cargadores frontales: equipos transportables que permiten mayor versatilidad, movilidad y velocidad en las operaciones; poseen bajo costo de mantenimiento y reparaciones; requieren terrenos consolidados (Figura 2.10).
- Cargador con orugas: equipos transportables de mayor envergadura que se emplean en terrenos poco consolidados (Figura 2.11).
- Tractores agrícolas modificados: equipos adaptados con una plataforma o grúa incorporada.



Figura 2.10. Cargador frontal de trozas de *Pinus ponderosa* (Junín de los Andes, Neuquén).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2008).



Figura 2.11. Cargador de trozas con oruga de *Nothofagus pumilio* (Tolhuin, Tierra del Fuego).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2017).

Descortezado

El objetivo del descortezado es separar, a la altura del cambium, la corteza de la madera; sus principales ventajas son:

- Preservar los elementos de corte.
- Disminuir el peso de las trozas.
- Disminuir o evitar el desarrollo de insectos que atacan la madera verde.
- Generar residuos limpios para las industrias de pulpa y tableros de fibras y partículas.
- Mejorar el posicionamiento de la troza en el carro para realizar el aserrado principal y consecuentemente, mejorar la calidad del corte.

Los métodos usados en el descortezado de las trozas con destino a aserrado son los siguientes:

- Descortezado manual.
- Cabezales descortezadores.
- Descortezador de anillo mecánico.

En el **descortezado manual** se emplean machetes o palas descortezadoras. Generalmente, es un trabajo que se realiza en el monte, posterior al volteo y desrame. Debe realizarse con la troza en un máximo contenido de humedad, donde las células del cambium están hidratadas y facilitan el trabajo. Es conveniente descortezar en verano cuando el árbol se encuentra en actividad.

El **cabezal descortezador** es un rotor con cuchillas tangenciales que van descortezando la troza a medida que pasa por la superficie de la misma. Es un sistema donde la troza va girando sobre su eje a través de rodillos ubicados en forma transversal al largo de la misma, mientras que el cabezal descortezador va recorriendo toda la troza movido por un brazo hidráulico (Figura 2.12). Es utilizado para *Eucalyptus* spp. y otras latifoliadas donde la corteza forma tiras de gran resistencia y no son efectivos los descortezadores de anillo mecánico.



Figura 2.12. Cabezal descortezador.
Fuente: Huertas Monte (2020)¹¹.

El **descortezador de anillo mecánico** (Figura 2.13) está constituido por un marco base que contiene un rotor basculante de gran potencia, sobre el que se disponen los elementos de cortes (cuchillas) en número variable de 4 a 6; el rotor, con forma de anillo, se centra automáticamente según el diámetro de la troza a descortezar; las cuchillas están formadas por dos partes, el brazo y la punta afilada o cuchilla propiamente dicha. La punta afilada es fijada en el extremo del brazo mediante dos tornillos que facilitan su recambio para el afilado. El brazo se retira solo en caso de daño o desgaste para su mantenimiento.

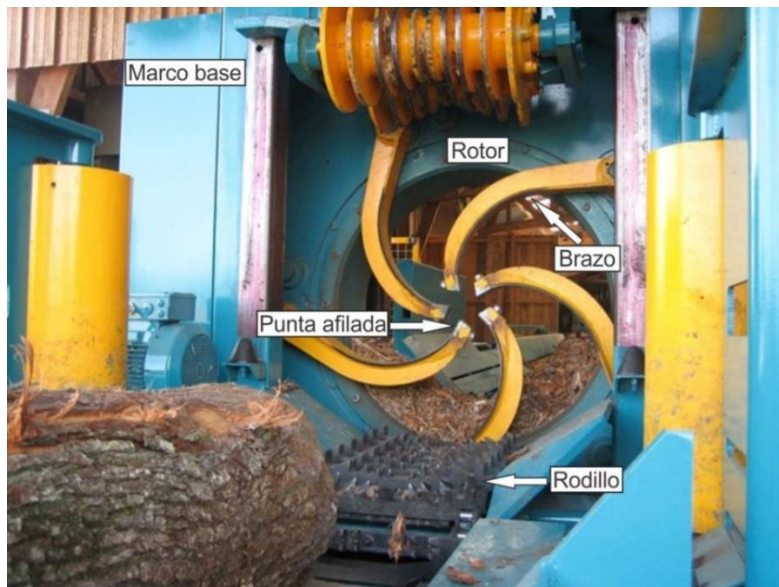


Figura 2.13. Descortezador de anillo mecánico.
Fuente: Direct Industry (2020)¹².

¹¹ www.iesboliches.org/tecnologia/index.php/03-la-madera/03-obtencion-de-la-madera

¹² www.directindustry.es/prod/segem/product-63783-853679.html

El proceso de descortezado solo lo realizan las cuchillas, las cuales trabajan en un patrón en espiral y disponen de un sistema neumático de presión variable para acomodar la profundidad del descortezado según el tipo de corteza. Asimismo, cuenta con rodillos prensores y motrices, ubicados en la entrada del descortezador, los cuales ascienden y descienden hidráulicamente según el diámetro de la troza a descortezar; estos rodillos cumplen las funciones de fijación y alimentación simultáneamente. A la salida del descortezador se encuentran otros rodillos, de la misma naturaleza que los anteriormente descritos, que completan el proceso de fijación y alimentación una vez que la troza es liberada por los rodillos anteriores. Generalmente, y según el modelo, son triangulares y se ubican de a tres en cada una de las partes del descortezador, entrada y salida; están equipados con puntas endurecidas que penetran la corteza, para poder alimentar la troza. La fuerza de sujeción tiene que ser lo suficientemente grande como para evitar que la troza gire cuando los elementos descortezadores están sobre ella realizando el trabajo de descortezado, pero no tan grande como para dañar la madera. Por lo tanto, la presión de los rodillos en el lado de salida de la troza descortezada, siempre es programada a un valor inferior respecto a la presión de entrada. En términos generales, a través del uso de este descortezador, la capa del cambium es aplastada por las grandes fuerzas de cizalle resultantes para que se desprenda la corteza; presenta un uso generalizado para el descortezado de coníferas, pudiéndose emplear también para latifoliadas (García Esteban *et al.*, 2002; Andía *et al.*, 1995).

La productividad de un descortezador mecánico según el INFOR (1989) se calcula de la siguiente manera (Fórmula 2.9):

$$P \left(\frac{\text{trozas}}{\text{turno}} \right) = \frac{T \times U \times K_1 \times K_2}{L} \quad (2.9)$$

Donde: *P*: productividad, en trozas por turno; *T*: duración del turno, en s; *U*: velocidad de avance, en m/s; *K*₁: coeficiente de uso del tiempo de trabajo (0,8-0,9), adimensional; *K*₂: coeficiente de uso de la máquina (0,7-0,8), adimensional; *L*: longitud de la troza, en m.

En el caso de los descortezadores de cabezal y mecánico, los criterios de selección del equipo y de optimización del proceso son los siguientes:

- Capacidad de producción del aserradero (pie²/turno)
- Capacidad del descortezador: en relación al consumo diario máximo de madera en planta.
- Características de las trozas: especie (las latifoliadas son más difíciles de descortezar que las coníferas), dimensiones (longitud y diámetros), y defectos.
- Potencia requerida para alimentar la descortezadora y para el trabajo del cabezal descortezador.
- Costo del descortezador.
- Disponibilidad de stock de piezas de repuesto en el mercado
- Pre-tratamiento de la madera antes de descortezar.
- Superficie de almacenamiento (playa de trozas).

Tronzado

El tronzado consiste en cortar las trozas en forma transversal a su eje, para dar la longitud de trabajo. Cuando las trozas llegan del monte con fuste entero, el aserradero debe contar con un equipo de sierra circular de gran diámetro para el tronzado permanente de los fustes a la longitud requerida, según el carro o sistema de alimentación de la sierra principal (Figura 2.14). En aserraderos con tronzado eventual, el trabajo se realiza con motosierra. En Argentina, las trozas se dimensionan en longitud durante el aprovechamiento, por lo que no se hacen trabajos de tronzado en la planta de aserrado, a excepción de trozas defectuosas o con curvaturas pronunciadas donde se requiere este proceso para obtener trozas más cortas a fin de disminuir la intensidad del defecto.



Figura 2.14. Tronzador de sierra circular.
Fuente: Huertas Montes (2020)¹³.

Consideraciones finales

Este capítulo resalta por un lado, la importancia de conocer los principales factores que se encuentran involucrados en la industria de aserrado, con el objetivo de lograr un mejor manejo y planificación de la misma, tanto a corto como a mediano y largo plazo. Por otro lado, se destaca la importancia del sector de la playa de trozas, donde, bajo un manejo adecuado de la materia prima, se logrará la obtención de productos de calidad, maximizando productividad, rendimiento y eficiencia.

¹³ www.iesboliches.org/tecnologia/index.php/03-la-madera/03-obtencion-de-la-madera

Referencias

- Andía, I.; Otaño, M.; Keil, G. (1995). Alternativas de industrialización de madera de álamo. Buenos Aires, Argentina: Consejo Federal de Inversiones.
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition. EU transparency register N°389996116741-55.
- European Environment Agency. (2018). The circular economy and the bioeconomy: partners in sustainability. EEA Report N°18. Luxembourg: Publications Office of the European Union. ISSN 1977-8449.
- FAO. (1982). Aserraderos pequeños y medianos en los países en desarrollo, guía para su planificación y establecimiento. Roma. Estudio FAO Montes N°28. Roma.
- Fronius, K. (1990). Técnicas de Aserrado. Material didáctico. Concepción, Chile.
- García Esteban, L.; Guindeo Casasús, A.; Peraza Oramas, C.; de Palacios de Palacios, P. (2002). *La madera y su tecnología*. Madrid, España: Ed. Mundi Prensa.
- Husso, M.; Nybakk, E. (2010). Importance of internal and external factors when adapting to environmental changes in SME sawmills in Norway and Finland: The manager's view. *Journal of Forest Products Business Research*, 14pp.
- INFOR. (1989). Principios de organización y operación del aserradero. Manual N°16. Concepción, Chile: Corporación de fomento a la producción.
- Loray, R. (2015). ¿La bioeconomía como modelo de desarrollo? Recursos naturales y políticas públicas en ciencia, tecnología e innovación. *Revista Estado y Políticas Públicas*, (5), 99-118.
- IRAM 9502. (1957). *Definiciones de términos para la comercialización de maderas y de interés tecnológico*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Näyhä, A. (2019). Transition in the Finnish forest-based sector: Company perspectives on the bioeconomy, circular economy and sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 209, 1294-1306.
- Packalen, T.; Kärkkäinen, L.; Toppinen, A. (2017). The future operating environment of the Finnish sawmill industry in an era of climate change mitigation policies. *Forest Policy and Economics*, 82, 30-40.
- Rossi, P. (2006). Gestión de los costos y gastos de las pymes de la madera y del mueble. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Madera y Muebles.

CAPÍTULO 3

Proceso de aserrado: sierras y mecanismos complementarios

Gabriel D. Keil y Carla Taraborelli

Consideraciones generales

Una planta de aserrado está equipada, principalmente, con sierras sinfín y circulares para realizar los distintos cortes, longitudinales y transversales, que intervienen en la producción de madera aserrada. Los productos secundarios de mayor volumen (costaneros, restos de corteza, cantos, despuntes y tablas defectuosas), son reducidos a chips en máquinas astilladoras para usos alternativos, a fin de lograr la sustentabilidad del aserradero y del recurso.

El proceso se completa con una serie de equipos complementarios a las sierras, que si bien no intervienen directamente en el corte de la madera, están presentes desde la playa de trozas hasta la obtención de madera aserrada y productos secundarios, permitiendo la fluidez del proceso de aserrado.

Equipos para aserrar

Los equipos para aserrar madera, denominados **sierras**, se pueden clasificar en base al **tipo** y a la **función** que cumplen en el proceso de aserrado. Para entender la función que cumplen dichas sierras, primero se debe caracterizar el producto que se obtiene a partir del proceso de aserrado: la **madera aserrada**. Las partes y términos geométricos que la definen se representan gráficamente en la Figura 3.1 (IRAM 9664, 2013; IRAM 9670, 2002; JUNAC, 1984), y se detallan a continuación:

Cara: superficie plana mayor paralela al eje longitudinal de una pieza. Una pieza tiene dos caras paralelas entre sí.

Canto: superficie plana menor perpendicular a la cara y al eje longitudinal de una pieza. Una pieza está constituida por dos cantos paralelos entre sí.

Arista: línea recta de intersección entre dos superficies adyacentes, cara y canto.

Cabeza: sección transversal de cada extremo de una pieza.

Espesor: dimensión menor de la escuadría.

Ancho: dimensión mayor de la escuadría.

Escuadría: expresión numérica de las dos dimensiones de la sección transversal de una pieza de madera trabajada a escuadra. En términos generales, se denomina con la menor medida seguida por la mayor medida, ambas en pulgadas (Ej: 2" x 4"). Dependiendo de estas dimensiones pueden obtenerse productos como tablas, vigas, tablones, entre otros

Longitud: distancia entre las cabezas de una pieza.

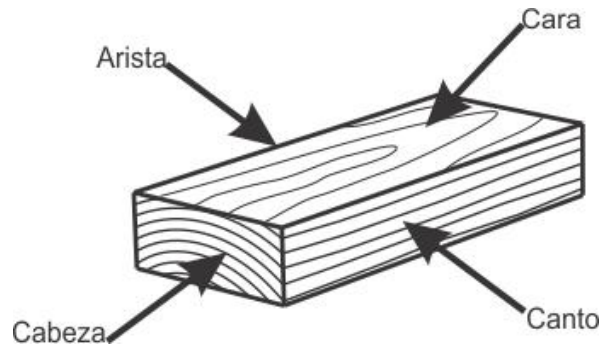


Figura 3.1: partes de madera aserrada.
Fuente: Spavento & Keil (2008).

Otros conceptos sobre madera aserrada serán detallados en el Capítulo 5.

Los tipos de sierras que se pueden encontrar en la industria son **sinfín**, **circulares** y **alternativas**, estas últimas de poco uso en Argentina. Luego se encuentran las tecnologías más avanzadas representadas por las sierras chipeadoras o **chipper canter** y los equipos o máquinas **perfiladoras**.

En cuanto a su función, el **aserrado principal** lo realizan las máquinas que actúan directamente sobre la troza para realizar los primeros cortes; las trozas parcialmente aserradas pasan por una **desdobladora** donde generalmente se da el **espesor** a la futura pieza aserrada. El paso posterior del proceso es el **canteado** donde se da el **ancho** y, finalmente el **despuntado** en el que se le otorga el **largo** definitivo a la pieza aserrada.

Todos estos procesos se pueden realizar con distintos tipos de equipos que se sintetizan en la Tabla 3.1.

Tipo de sierra	Función			
	Aserrado principal	Reaserrado		
		Desdoblado	Canteado	Despuntado
Sinfín	Vertical simple (mono o bicorte) Vertical doble Inclinada simple Horizontal fija Horizontal móvil	Vertical simple (mono o bicorte) Vertical doble Vertical en tándem Horizontal simple Horizontal doble Horizontal en tándem	<i>no hay sierras específicas para esta función</i>	<i>no hay sierras específicas para esta función</i>
Circular	Simple estacionaria Simple portátil horizontal o vertical Simple portátil de 2 posiciones Doble de 1 eje Doble de 2 ejes	Simple estacionaria Múltiple de 1 eje Múltiple de 2 ejes	Simple estacionaria Doble de 1 eje Múltiple de 1 eje	Simple de eje fijo Simple de eje móvil: de péndulo, de brazo articulado y monorriel Doble de 1 eje
Alternativa	Vertical múltiple	Vertical múltiple	<i>no hay sierras específicas para esta función</i>	<i>no hay sierras específicas para esta función</i>
Chipeadora	Chipper canter	<i>no hay sierras específicas para esta función</i>	Chipper canter	<i>no hay sierras específicas para esta función</i>
Perfiladora	Equipo perfilador			<i>no hay sierras específicas para esta función</i>

Tabla 3.1. Proceso de aserrado: tipo de sierra y función.
Fuente: propia (2020).

Sierras sinfín

Estas sierras se emplean para realizar el primer corte, como sierra principal; para los cortes subsiguientes, como sierra desdobladora, o para el reaprovechamiento de costaneros; al ser máquinas grandes y pesadas no se usan para cantear ni para despuntar tablas o vigas.

Cuando se utiliza como sierra principal, desde el pupitre o cabina de mando se controla el posicionado y fijación de la troza sobre las escuadras, la aproximación del carro a la cinta de corte, la velocidad de alimentación, la evacuación de la pieza y el retorno del carro. La definición y función del carro será especificada en el apartado de mecanismos complementarios del presente capítulo.

En todos los casos, el órgano de corte de la sierra sinfín está formado por una cinta dentada montada sobre dos volantes. Según la posición de los volantes, la sierra se clasifica en **vertical** cuando un volante está sobre otro, **horizontal** cuando ambos volantes están a la misma altura, e **inclinada** cuando la línea que une el centro de ambos volantes está en un ángulo de 30 a 45 grados con la vertical.

Una sierra sinfín vertical simple posee los siguientes componentes (Figura 3.2):

- (1) Montante o bastidor.
- (2) Volante superior.
- (3) Volante inferior.
- Sierra cinta (visible entre volantes).
- Protector de cinta (en los volantes, no visible).
- (4) Brazo soporte.
- (5) Guía superior móvil.
- (6) Guía inferior fija.
- (7) Elementos de limpieza de la cinta.
- (8) Motor.
- (9) Reserva de lubricante superior.
- (10) Reserva de lubricante inferior.
- (11) Lubricante de cinta.
- (12, 13, 14 y 15) Elementos del carro.
- (16) Sistema para aflojar la cinta.

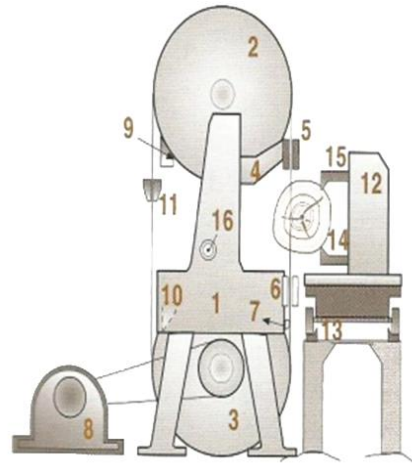


Figura 3.2. Componentes de una sierra sinfín.
Fuente: García Esteban et al. (2002).

El **montante o bastidor** es una pieza pesada y rígida, de fundición, especialmente en sierras de alta velocidad donde se requiere disminuir las vibraciones durante el proceso para generar un corte regular y exacto; su base se fija al suelo mediante una fundación. Tiene por función sostener a los dos volantes.

El **volante superior** se denomina “loco” ya que gira por el impulso de la cinta y puede desplazarse verticalmente a fin de tensarla para realizar el corte, o bien, para quitarle tensión para su recambio. Este volante posee un borde convexo e inclinado para evitar el deslizamiento de la cinta hacia afuera por el empuje de la madera durante el corte.

El perfil de la llanta de los volantes (Figura 3.3) puede ser plano (1) o curvo (2, 3). En sierras bicorte el perfil curvo es simétrico (2) y en sierras mono corte es asimétrico 1/3 a 2/5 del ancho del volante (3) (García Esteban et al., 2002).

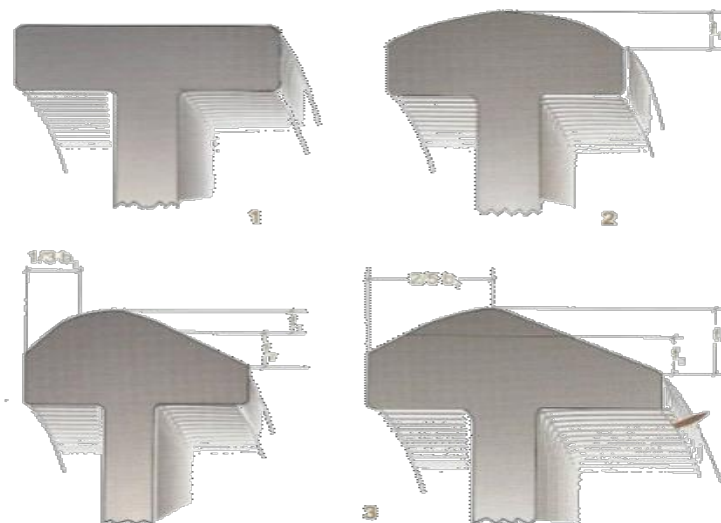


Figura 3.3. Perfiles de los volantes.
Fuente: García Esteban et al. (2002).

Los valores de curvatura dependen del ancho de la llanta del volante; los volantes de perfil curvo son los más estables, usados en todo el mundo excepto en EEUU donde son planos.

El **volante inferior** es quien recibe la potencia motriz y transmite esa potencia a la cinta y, a través de ella, al volante superior. Ambos volantes poseen diámetros iguales y su función en conjunto es tensar la cinta y mantenerla en movimiento. En las sierras con volantes ≤ 1.100 mm de diámetro, las coronas o caras externas están recubiertas con cuero, corcho o goma para mejorar la adherencia.

La posición de los volantes debe tener una leve inclinación con respecto a la vertical, esto permite a la cinta un equilibrio indispensable para su normal funcionamiento, además sirve para que salgan los dientes de la cinta sobre la corona de la llanta (García Esteban *et al.*, 2002).

En las máquinas más antiguas, los volantes tienen radios o rayos, mientras que en las más modernas es un disco compacto de hierro fundido, acero, o aluminio en las máquinas más livianas. Las sierras de alta velocidad se fabrican con volantes de disco en hierro fundido, porque requieren mayor peso para ser más equilibradas.

En la sierra, se encuentran dos guías: la **guía superior móvil** -ascendente, descendente-, ubicada en un brazo guía que puede deslizarse en el tramo de la cinta por encima del carro de alimentación o la mesa de trabajo; esta guía posee un tornillo de bloqueo y contrapesos para facilitar su movimiento. La **guía inferior fija** se ubica en la mesa o debajo de ella

La función de ambas guías es evitar las vibraciones perpendiculares al plano de la hoja, por lo que siempre debe trabajarse con la menor distancia entre ellas que permita el diámetro de la troza o la altura de la madera a aserrar, ya que si esta distancia aumenta, la posibilidad de producirse vibraciones que generen irregularidades en el corte, se incrementa.

Existen tres tipos de guías (Figura 3.4): guías mecánicas (1), de presión (2) y aerostáticas (3). Las mecánicas son maderas duras separadas un poco más que el ancho de la cinta; las de presión se basan en desplazar sobre la vertical entre ejes, el brazo de la guía superior (ϵ), de manera que la cinta está obligada a friccionar continuamente sobre dicha guía, la cual está constituida por un elemento rígido (goma); aunque su eficacia es superior a las mecánicas, se debe lubricar para evitar sobrecalentamientos; las guías aerostáticas son inyectores de aire a presión ubicados a ambos lados de la cinta (García Esteban *et al.* 2002).

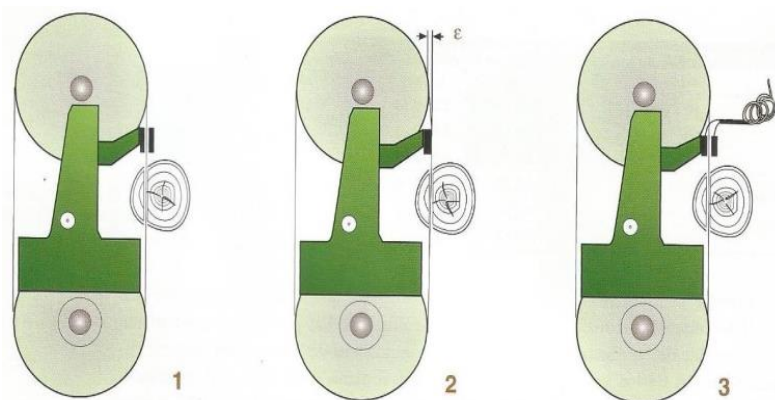


Figura 3.4. Tipos de guías.
Fuente: García Esteban *et al.* (2002).

El **protector de cinta** tiene por función proteger al operario de los dientes de la sierra durante el aserrado, y evitar la salida o salto de los volantes en caso de cortarse la cinta; para el recambio de la cinta, el protector puede abrirse tal como se observa en la Figura 3.5. La cinta entre volantes está mayoritariamente encerrada en una caja metálica en uno de sus lados, y en el lado opuesto, hay una caja “de guarda” que permite ver la cinta libre sólo en la zona de corte. Posee además una palanca de tensión, que desconecta automáticamente la máquina en el caso de rotura de la cinta.



Figura 3.5. Protector de cinta abierto de sierra sinfín vertical simple-CTM.
Fuente: propia (2017).

La forma del diente de la cinta origina distintos ángulos de corte a tener en cuenta para el correcto uso del equipo: el ángulo de desahogo (α) que se forma entre la dirección del vector de movimiento de la hoja y la cara de desahogo del diente; el ángulo de afilado (β), formado entre las dos caras del diente; y el ángulo de ataque (γ), que se forma entre la dirección del vector de avance de la madera y la cara de ataque del diente. La suma de los 3 ángulos de corte determina los 90° (Figura 3.6).

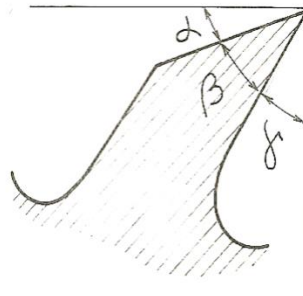


Figura 3.6. Ángulos de corte.
Fuente: INFOR (1989).

En una sierra sinfín, los parámetros que afectan al esfuerzo de corte son varios, como por ejemplo, la velocidad de corte que influye en el desgaste y la temperatura del diente. Sin

embargo, en velocidades normales de 5-50 m/s y espesores de corte de 0,5-1,5 mm dichos parámetros no se ven afectados. Para maderas duras, la velocidad recomendada es de 35 m/s, para maderas blandas de 45 m/s, y para coníferas una velocidad intermedia de 40 m/s, ya que si bien son maderas blandas, la mayoría de ellas tiene presencia de resina (García Esteban *et al.*, 2002).

La humedad de la madera también influye en el esfuerzo de corte ya que demanda mayores esfuerzos la madera seca que la madera húmeda. Asimismo, este concepto es más crítico en maderas livianas que en aquellas más densas, donde la humedad tiene menor incidencia. Por lo expuesto, se recomienda aserrar madera recién apeada o humedecida en playa de trozas, tal como se especificó en el Capítulo 2.

El desgaste y afilado del elemento de corte también influye en el esfuerzo de corte; a medida que se va perdiendo el filo de la sierra el esfuerzo es mayor, siendo más notorio en especies con presencia de resina que resultan abrasivas para el elemento de corte.

En lo que respecta al espesor de corte, el esfuerzo siempre es mayor a medida que aumenta el espesor, pero no es proporcional, por lo que, con un aumento de 4 veces el espesor de la sierra, sólo aumenta 2,4 veces el esfuerzo de corte. Si el ángulo de ataque (γ) aumenta, disminuye el esfuerzo, esto se da hasta los 40° , a partir del cual, el aumento del ángulo provoca un aumento del esfuerzo por deformación de la arista del diente (García Esteban *et al.*, 2002).

Los tipos de dientes están en función del tipo de madera y la velocidad de alimentación. La rigidez del diente es función de la relación paso/altura del diente: cuanto mayor es este cociente, mejor absorbe los esfuerzos de corte, siendo valores aceptables relaciones de 2,5-3 para maderas blandas y de 3-4 para maderas duras; los detalles del diente y sus partes se explicarán en el Capítulo 4. La tensión de montaje de las hojas es realizada por sistemas de contrapeso en máquinas antiguas; en máquinas modernas la tensión de montaje es mediante sistema con tornillo de tensión aplicado sobre el volante superior (tensión aplicable de 100 a 250 MPa) (García Esteban *et al.*, 2002).

Tipos de sierras sinfín

La sierra **sinfín vertical simple monocorte** tiene una cinta dentada en uno de sus frentes cortando sólo cuando avanza; mientras que la **sierra sinfín vertical simple bicorte** tiene dentados los dos frentes de la cinta, haciendo un corte cuando avanza y otro corte cuando retrocede (Figura 3.7). Cuando las hojas están dentadas en los dos frentes, son más anchas que cuando el dentado está en un frente.

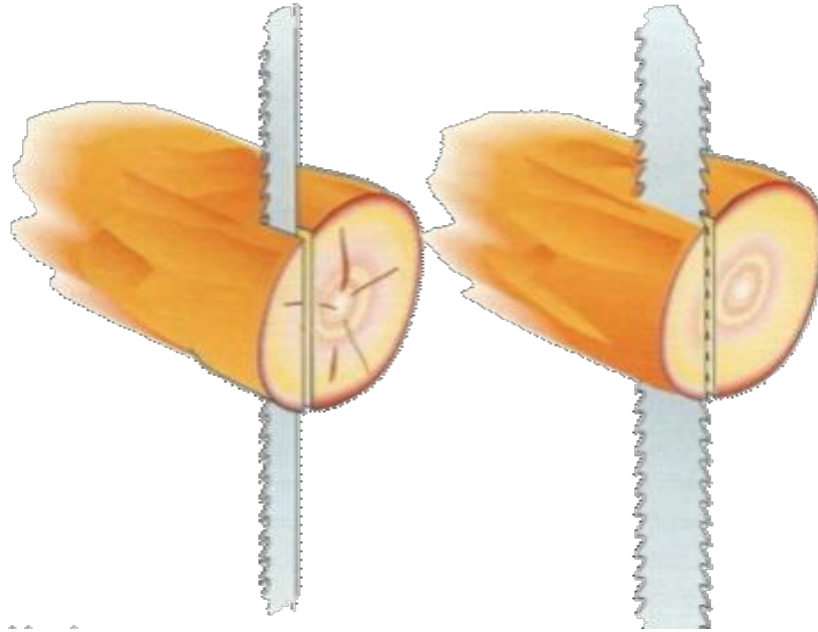


Figura 3.7. Sierras sinfín vertical simple mono y bicorte.
Fuente: García Esteban et al. (2002).

La **sierra sinfín vertical doble** (Figuras 3.8 y 3.9) está formada por dos sierras sinfín vertical simple enfrentadas o en espejo, también denominadas “gemelas”, las cuales realizan dos cortes simultáneos. Este tipo de sierra es muy común en aserraderos de especies con tensiones como los *Eucalyptus* spp.

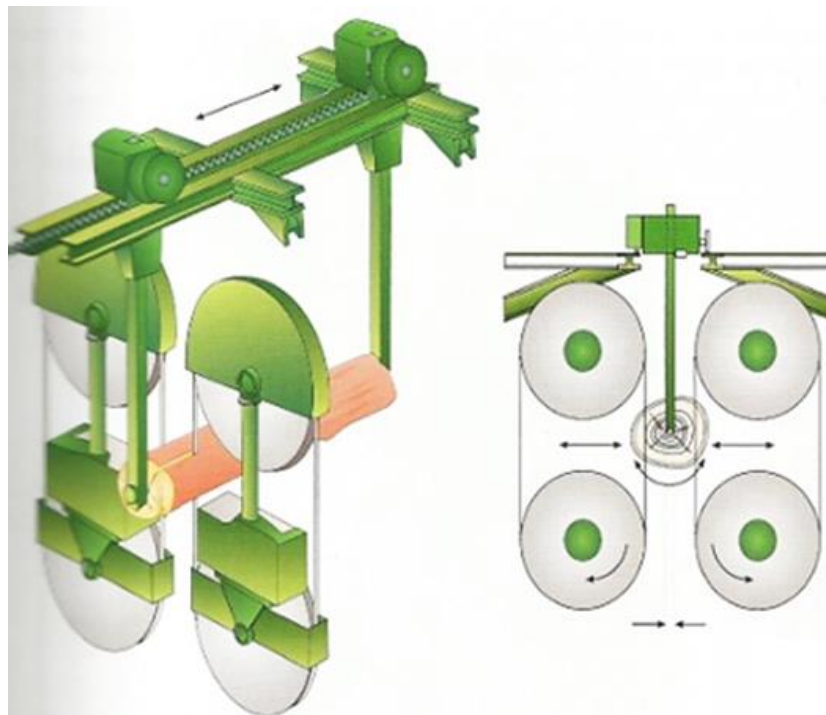


Figura 3.8. Sierra sinfín vertical doble.
Fuente: García Esteban et al. (2002).



Figura 3.9. Sierra sinfín vertical doble (Corrientes).
Fuente: propia (viaje de estudios Ing. Ftal, 2007).

La **sierra sinfín vertical cuádruple (o séxtuple)**, también denominada en tándem, está formada por dos gemelas (o tres) desplazadas en sentido vertical u horizontal, realizando 4 (o 6) cortes simultáneos; se trata de un equipo muy pesado y complejo, de uso incipiente en el país, empleado principalmente en aserraderos que producen pallets.

Es común el empleo de **sierras sinfín horizontales dobles, cuádruples o séxtuples**, también denominadas en tándem, para realizar 2, 4 ó 6 cortes simultáneamente para obtener 3, 5 ó 7 piezas en cada pasada, respectivamente. Un ejemplo de ello, lo constituyen los aserraderos que obtienen tablas y vigas para tacos de pallets.

La **sierra sinfín inclinada simple** (Figura 3.10) está formada por dos volantes cuyo eje que une ambos centros, está en un ángulo de 30 a 45 grados respecto a la vertical.



Figura 3.10. Sierra sinfín inclinada simple (Virasoro, Corrientes).
Fuente: propia (viaje de estudios Ing. Ftal., 2007).

En los aserraderos permanentes, en general, la sierra está unida a la fundación y la madera se mueve para hacer el corte; es el caso de la **sierra sinfín horizontal fija**. Este tipo de sierras se emplea generalmente en el reaprovechamiento de los costaneros gruesos para la obtención de tablas más angostas y cortas que las obtenidas en la sierra principal. De este modo, se aumenta el rendimiento del aserradero.

En los aserraderos portátiles, generalmente la sierra se desplaza sobre la troza fija para realizar el corte; es el caso de la sierra **sinfín horizontal móvil**.

Sierras circulares

Las sierras circulares son máquinas sencillas que se pueden emplear en todas las actividades del proceso de aserrado. Sin embargo, encuentran mejor performance empleadas como máquinas desdobladoras, canteadoras y despuntadoras.

El órgano de corte de la sierra circular es un disco dentado en su periferia; los dientes están reforzados con widia que es un material de mayor dureza que el cuerpo del disco. El cuerpo del disco está unido a un eje que transmite la potencia del motor provisto de tuerca de ajuste y collarín, el cual le otorga estabilidad en el plano de trabajo evitando el desplazamiento axial del disco. Los otros componentes incluyen el motor; la protección para el operario y el separador de tablas aserradas, este último ubicado en la parte posterior del disco a fin de que las tablas no se junten sobre el mismo, evitando su recalentamiento y el quemado de las mismas (INFOR, 1989).

Los parámetros básicos de la sierra circular están constituidos por el diámetro máximo del disco, las revoluciones por minuto (rpm) del eje motriz, la velocidad de corte, la velocidad de avance y la potencia del motor. Otras variables a considerar incluyen el espesor de la sierra, que está en función de su diámetro y que a su vez influye en el ancho de corte; el paso del diente,

que está en función del espesor y que determina la cantidad de dientes del disco; la altura, número y forma o perfiles de los dientes, y el radio de la garganta.

El diámetro de la sierra circular es igual a la suma del doble del diámetro de la troza a aserrar, más el diámetro del collarín, más 20 mm. En el caso de sierras simples, su diámetro máximo puede alcanzar los 1.500 mm; normalmente se usan sierras entre 1.200 y 1.350 mm. El diámetro del eje varía con el diámetro del disco y es de 25 mm para discos de 300 a 400 mm de diámetro, y de hasta 60 mm para discos de 1.400 a 1.500 mm de diámetro (García Esteban *et al.*, 2002).

El número de revoluciones del eje motriz debe adaptarse al diámetro del disco y a la velocidad periférica y depende de las revoluciones por minuto del motor con el cual trabaja, y de las poleas que comunican con ese motor y el eje. A medida que aumenta el diámetro del disco, disminuye el número de revoluciones e inversamente. Este valor se encuentra entre los 400 y 750 rpm. La potencia del motor depende en gran medida de la capacidad del aserradero y de la especie, avance, altura y ancho de corte.

Las principales características de estas sierras son:

- Menor costo de inversión y mantenimiento.
- Mayor robustez y simplicidad para operar.
- Simplicidad en el recambio del disco.
- No requieren de personal altamente calificado.
- Pueden ser accionadas por cualquier tipo de motor.
- En equipos con disco de gran diámetro con mayor cuerpo y canal de corte, una parte importante de la troza es convertida en aserrín, disminuyendo el rendimiento.
- Permiten la superposición de discos de menores diámetros.
- Alto consumo de energía para efectuar el corte.

Tipos de sierras circulares

Las sierras circulares pueden clasificarse según distintos criterios. Uno de ellos es de acuerdo al número de discos que presentan, clasificándose en simples, dobles o múltiples.

Las **sierras simples** constan de un solo disco. Cuando está sobre un equipo fijado a una fundación se denomina **sierra circular simple estacionaria**. Cuando es transportable, se denomina **sierra circular simple portátil**. Este tipo de sierras es común encontrarlas en aserraderos portátiles, pudiendo trabajar en posición horizontal, vertical o girar sobre su eje para actuar en ambas posiciones; son denominadas sierra circular simple portátil **horizontal**, sierra circular simple portátil **vertical** o sierra circular simple portátil **de dos posiciones**, respectivamente.

Asimismo, las sierras simples pueden presentar eje fijo o móvil. La **sierra circular simple de eje fijo** es aquella donde la madera avanza sobre la sierra fija; la **sierra circular simple de eje móvil** es aquella cuyo eje se desplaza durante el corte. Según la manera que se da ese desplazamiento, existen tres tipos sierras: de péndulo, cuando la sierra pivotea bajando o subiendo hacia la madera aserrada; de brazo articulado, cuando tiene un desplazamiento horizontal con un brazo que se articula para avanzar o retroceder; monorriel (Figura 3.11), cuando la sierra con

su eje horizontal o vertical se desplaza por un riel guía. Todas estas sierras se emplean en el despunte de piezas aserradas.



Figura 3.11. Sierra circular simple de eje móvil vertical (función despuntadora)-CTM.
Fuente: propia (2019).

Las **sierras dobles** son aquellas que presentan dos discos. Según la posición de éstos, se diferencian en **sierra circular doble de un eje**, cuando sobre el mismo eje se montan dos discos que realizan dos cortes simultáneos, y **sierra circular doble de dos ejes**, cuando los dos discos superpuestos están en dos ejes a distinta altura y ligeramente desplazados hacia adelante un disco de otro.

La sierra circular doble de un eje se emplea como canteadora (Figura 3.12) En la sierra canteadora, sobre el eje, un disco puede estar fijo y otro moverse a través de él para definir el ancho de corte, o ser móviles ambos discos para cumplir la misma función; éstos se encuentran dentro de una carcasa metálica (Figura 3.13), no expuestos para evitar accidentes de los operarios.

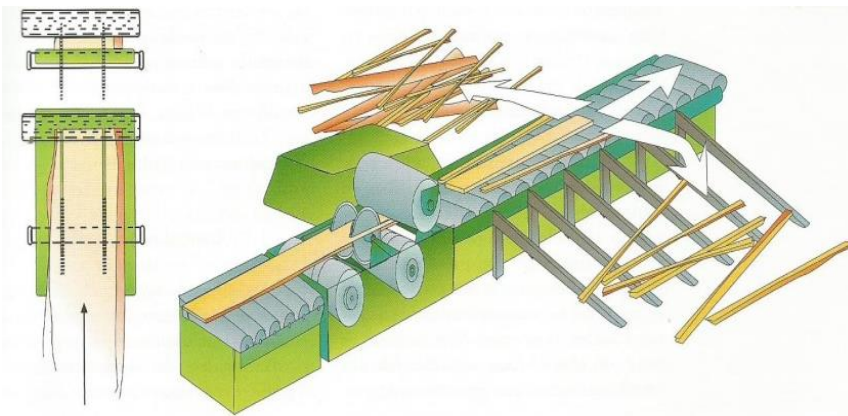


Figura 3.12. Trabajo de canteado con sierra circular doble de un eje.
Fuente: García Esteban et al. (2002).



Figura 3.13. Sierra circular doble de un eje con carcasa protectora (función canteadora)-CTM.
Fuente: propia (2021).

La sierra circular doble de un eje con mayor diámetro de discos, también se puede emplear como sierra principal en la línea de aserrado para trozas de raleos. Por otro lado, la sierra circular doble de ejes superpuestos se puede emplear para cortar trozas grandes con discos de menor diámetro, respecto al uso de una sola sierra para realizar el mismo trabajo; consecuentemente, su menor espesor genera menor cantidad de aserrín en el corte y aumenta el rendimiento.

Las **sierras circulares múltiples** constan de varios discos. Dichos discos pueden estar en uno o dos ejes superpuestos. La **sierra circular múltiple de un eje** permite el corte de piezas de hasta 3" de altura, mientras que la **sierra circular múltiple de dos ejes** (Figura 3.14), permite mayores alturas de corte empleando discos de menor diámetro. Esta última sierra se emplea en el desdoblado de grandes piezas provenientes de la sierra principal, pudiendo hacer de 5 a 7 cortes simultáneos, dependiendo del número de sierras con las que se cuenta.

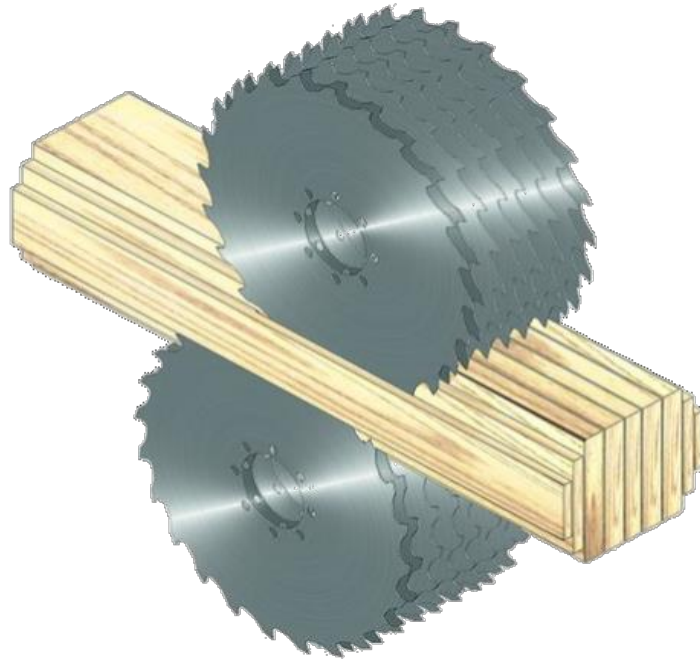


Figura 3.14. Sierra circular múltiple de dos ejes (función desdobladora).
Fuente: García Esteban et al. (2002).

Sierras alternativas

Este equipo consta de un bastidor o marco donde van montadas varias hojas de sierra; la troza es alimentada por cadenas o por un carro especial y fijada con rodillos dobles (arriba y abajo), previo y posterior al aserrado. Las sierras basan su funcionamiento en un movimiento de vaivén alternativo, ascendente-descendente, aportado por el efecto de un mecanismo de biela-manivela que transforma el movimiento circular en un movimiento de arriba hacia abajo y viceversa (Figuras 3.15 y 3.16). En el descenso cortan la madera a medida que realizan el avance. El avance es de 2 a 15 mm por descenso, según se corte madera dura o blanda, respectivamente. Las hojas no deben presentar ningún movimiento lateral, es decir que los planos de corte de las hojas deben ser paralelos a la dirección de avance del sistema de alimentación. El montaje de las hojas en el bastidor no debe hacerse en el mismo plano, de manera que las hojas exteriores intervengan en la troza antes que las interiores. Las hojas deben montarse simétricamente respecto al bastidor que las contiene.

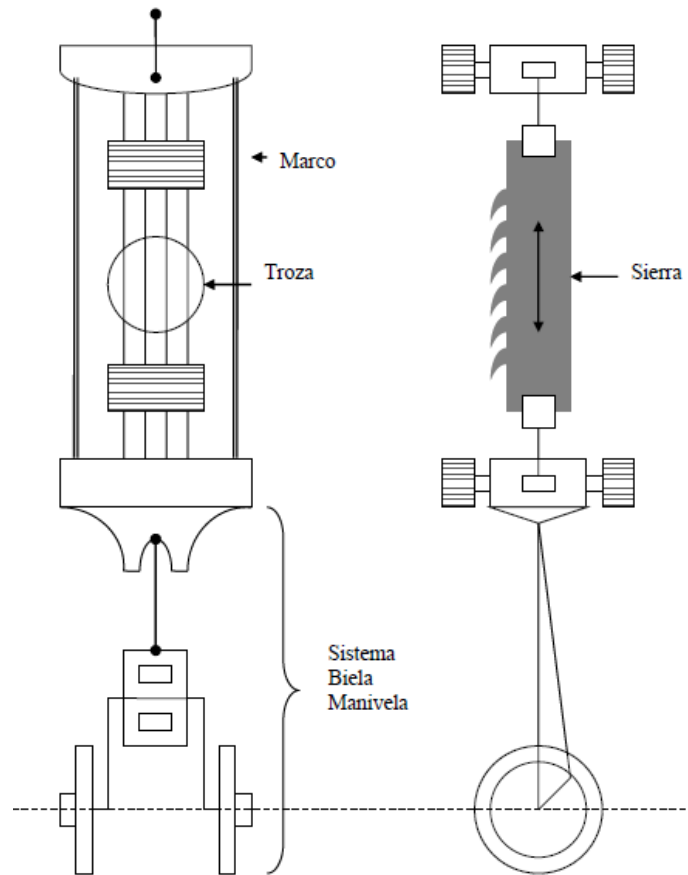


Figura 3.15. Mecanismos de una sierra alternativa.
Fuente: INFOR (1989).

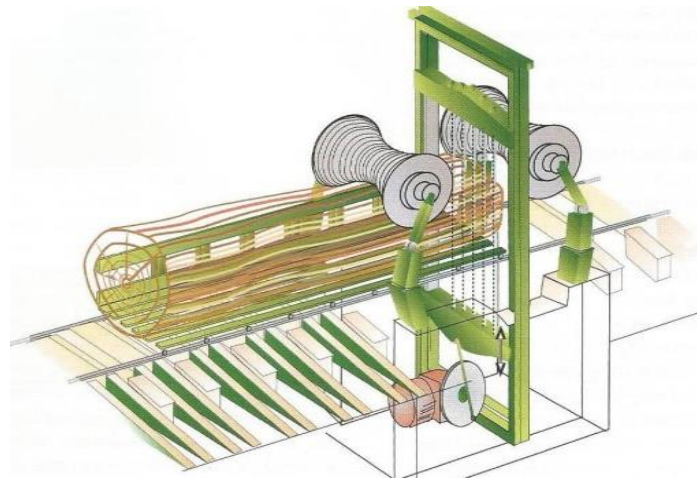


Figura 3.16. Sierra alternativa.
Fuente: García Esteban et al. (2002).

El equipo realiza varios cortes simultáneos en una sola pasada (vertical múltiple), reduciendo notablemente el tiempo de manipulación de la troza y aumentando la productividad. Asimismo, produce un aserrado de alta calidad, debido a la rigidez de las hojas durante el corte y tiene como ventaja la facilidad de acceso para la inspección permanente de las hojas.

Actualmente, dicho equipo se emplea como sierra principal o como sierra desdobladora para trozas parcialmente aserradas en una sierra principal sinfín vertical doble.

Como características diferenciales de estos equipos puede señalarse:

- No es posible modificar el mecanizado según los defectos de la troza.
- Requiere de clasificación diamétrica y por calidad de las trozas antes de su aserrado, a diferencia de las otras sierras donde la clasificación es recomendable.
- La velocidad de corte es más lenta que la de las sierras sinfín y circular.
- La productividad es mayor por el número de cortes simultáneos que realiza.
- Su regulación requiere conocimientos y experiencia.
- El cambio de las hojas es costoso.
- Requiere bancadas sólidas y de gran peso para evitar vibraciones.

Estos aspectos hacen que este equipo sea muy difícil de encontrar en la industria local.

Chipper canter

Estas máquinas, conocidas como **canteadoras astilladoras**, constan de discos astilladores y sierras circulares múltiples. La estructura del equipo está compuesta por uno o dos conos truncados sobre el cual van las cuchillas o herramientas que realizan el corte, todo ello constituye los discos astilladores. Si el equipo cuenta con cuatro discos (Figura 3.17), de una sola pasada se obtiene la viga central lista para su desdoblado posterior; si el equipo cuenta con dos discos laterales (Figura 3.18), la troza requiere dos pasadas con un volteo intermedio para su escuadrado completo. El equipo se completa con sierras circulares múltiples de dos ejes, para realizar el desdoblado de la viga central escuadrada. Un equipo de igual sistema de trabajo pero de menor envergadura se emplea en el canteado de tablas, donde un par de discos laterales, transforman los cantos en chips a medida que cantea las piezas aserradas.

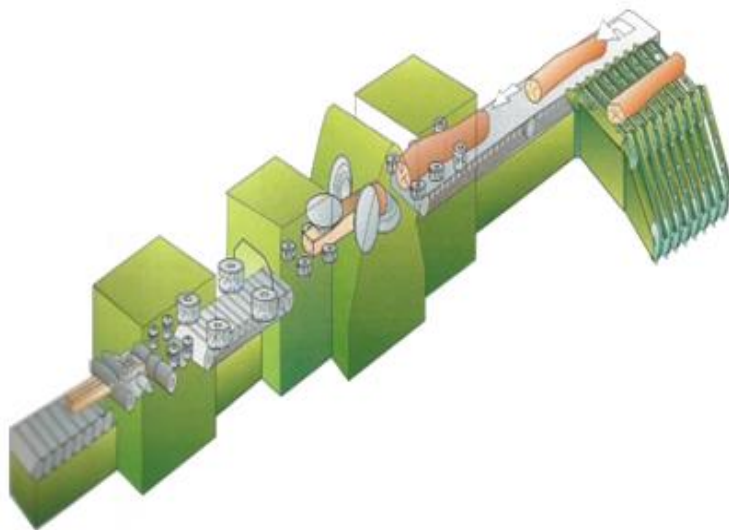


Figura 3.17. Esquema de trabajo de chipper canter con 4 discos chipeadores.
Fuente: García Esteban et al. (2002).



Figura 3.18. Equipo Chipper canter con 2 discos chipeadores.
Fuente: Mohringer (sf)¹⁴.

Esta tecnología permite transformar parte de la madera (costaneros) en astillas, generando caras planas que son tomadas como base para un posterior corte, o bien, pasan a ser cara de productos laterales (tablas) obtenidos de la sección o semibasa. De este modo, no requieren de un proceso de canteado, requiriendo solo el despuntado (dimensionamiento en longitud) al final del proceso. Sin embargo, al igual que la sierra alternativa, es necesaria una clasificación diamétrica y por calidad de las trozas antes de su aserrado, ya que trabaja con rango de diámetros más acotados.

Su capacidad de producir astillas de buena calidad y reducir la cantidad de desechos en el proceso ha hecho que esta máquina pase a formar parte importante en las plantas de aserrado modernas.

Perfiladora

Las máquinas perfiladoras consisten en un paquete tecnológico compuesto por discos chipeadores, fresas canteadoras y sierras circulares múltiples de dos ejes. Cuando la troza ingresa al equipo, los discos chipean los costaneros finos, generando chips limpios, las fresas cantean las futuras tablas, generando virutas, y las sierras circulares separan las tablas por sus caras, generando aserrín durante el proceso (Figura 3.19)

Es una de las técnicas más modernas donde se trabaja con madera de bosque implantado, con trozas previamente clasificadas y descortezadas, por lo tanto, las tablas y chips obtenidos, se encuentran libres de corteza. Es un equipo costoso y complejo, de gran productividad y calidad

¹⁴ <https://www.moehringer.com/en/products-bandsaw-technology/>

de corte. Si bien hasta el momento no se ha reportado su utilización en el país, es factible su incorporación a futuro en aserraderos de alta productividad, realizando un aprovechamiento integral de la troza.

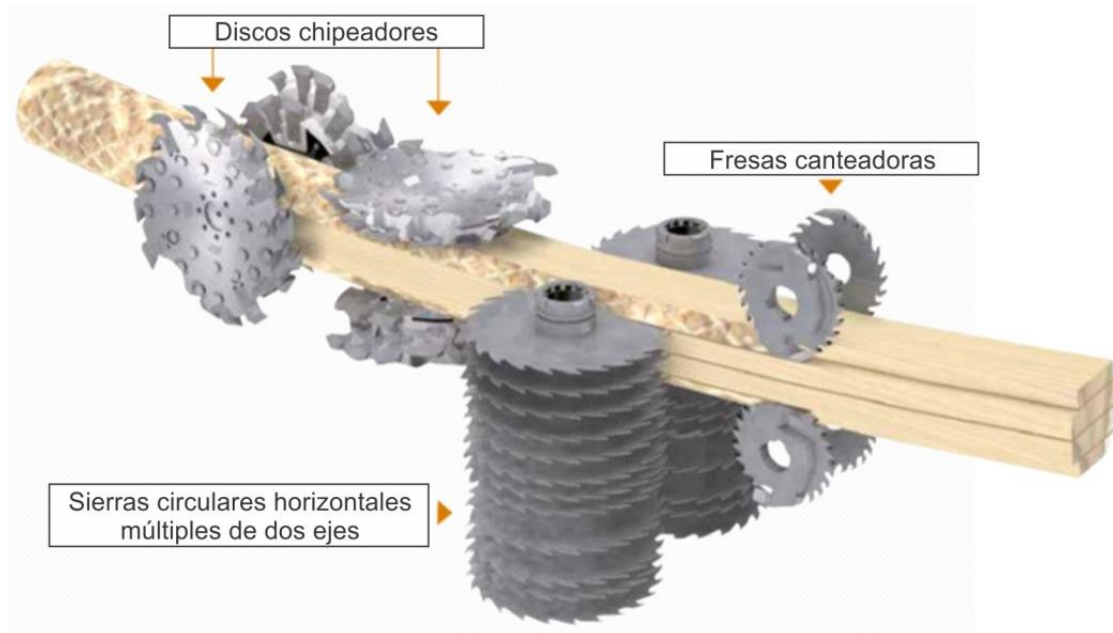


Figura 3.19. Perfiladora.
Fuente: adaptada de HewSaw (2021)¹⁵.

Mecanismos complementarios

Los mecanismos complementarios son aquellos que no intervienen directamente en el corte de la madera, pero participan en el proceso de aserrado de diferentes modos: preparando la madera para los distintos cortes y/o liberando la línea de producción de los productos ya obtenidos, acondicionándolos y eliminando los productos secundarios que se van generando durante el aserrado de una troza, manteniendo los elementos de corte, entre las principales actividades.

A continuación se detallan los mecanismos más importantes, posibles de encontrar en una planta de aserrado, y sus funciones.

La **plataforma de carga de trozas largas** tiene como función acumular las trozas que vienen del monte o de la misma playa, para ser procesadas en el descortezador.

El **descortezador** cumple la función de eliminar la corteza de las trozas, cuando es requerido. Es alimentado desde la plataforma de carga de trozas largas, tal como se describió en el Capítulo 2.

El **clasificador mecánico de rollos** organiza las trozas según su clase diamétrica. Está ubicado posteriormente al descortezador donde a medida que pasan los rollos por un sistema de

¹⁵ https://hewsaw.com/wp-content/uploads/2019/12/HewSaw_Main_Brochure_English_2017.pdf

cadena, van siendo volteados por pateadores que los colocan en distintos *boxes*. Puede haber un clasificador mecánico de rollos sin la presencia de un descortezador previo.

Si las trozas provienen del monte sin la longitud de trabajo definida por el sistema de avance de la sierra principal, luego del descortezador, deben ser dimensionadas en longitud en un **tronzador** de sierra circular. Cuando se requiere un tronzado adicional y/o se trata de aserraderos pequeños, el mismo se realiza con motosierra.

La **plataforma de carga de la sierra principal** (Figura 3.20), tiene por función acumular trozas que se trasladan con el cargador, desde las pilas de la playa, o desde sectores de acumulación de trozas clasificadas.



Figura 3.20. Plataforma de carga de trozas a la sierra principal-CTM.
Fuente: propia (2020).

El sistema **detector de metales** cumple la función de identificar las piezas metálicas (magnéticas y no magnéticas) insertas en la troza antes de que llegue a la sierra y produzca daños en los elementos de corte y en las máquinas en el mecanizado posterior.

Los **sistemas para la optimización de la troza** tienen por función analizar la obtención de piezas aserradas de la mejor calidad con un máximo rendimiento y en el menor tiempo posible.

Los **cargadores de trozas** cumplen la función de cargar las trozas de a una, desde la plataforma de carga de la sierra principal al sistema de alimentación de dicha sierra. Los cargadores poseen un sistema denominado *stop and loader* que cargan una troza al carro y con la parte posterior del implemento, hacen tope sobre la troza siguiente que se encuentra en la plataforma de carga (Figura 3.21).



Figura 3.21. Cargador de trozas.
Fuente: García Esteban et al. (2002).

Los **volteadores**, o también denominados **giratroncos**, cumplen la función de hacer girar la troza entera o la pieza parcialmente aserrada para realizar un corte a 90° del anterior o un corte en el lado opuesto de la troza. Estos pueden ser **de barra** (Figura 3.22), cuando están constituidos por una barra dentada telescópica que sube y se clava en la troza para hacerla girar mientras asciende, o bien, **de cadena** (Figuras 3.23 y 3.24), los cuales consisten en una cadena sinfín con agarre que funciona como la cadena de una motosierra, a medida que gira hace presión sobre la troza y ésta sobre las escuadras o sobre los *flaps*, produciendo el movimiento de rotación de la troza para darle una nueva ubicación frente a la sierra.

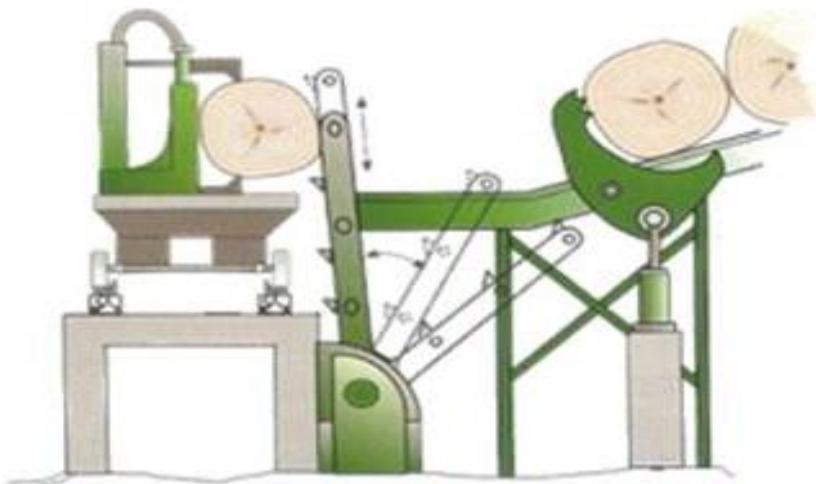


Figura 3.22. Volteador de barra.
Fuente: García Esteban et al. (2002).



Figura 3.23. Volteador de cadena-CTM.
Fuente: propia (2020).



Figura 3.24. Trabajo de los volteadores de cadena-CTM.
Fuente: propia (2020).

Los **órganos de avance** están constituidos por cadenas, cintas, rodillos y carros de alimentación.

Las **cadenas de alimentación** (Figura 3.25), tienen la función de mover las trozas o parte de ellas, madera aserrada o residuos gruesos. Generalmente, se usan como sistema de alimentación de rollizos en descortezadores, en el movimiento de trozas del clasificador mecánico, y en la alimentación de sierras sinfín o circulares dobles de un eje, usadas como sierra principal. Permiten un avance suave y parejo, son de fácil construcción y deben complementarse con rodillos de sujeción para apretar la troza sobre la cadena, y evitar así el descentrado con respecto al órgano de corte cuando se emplean en la alimentación de una sierra.



Figura 3.25. Cadena para el movimiento de madera aserrada-CTM.
Fuente: propia (2020).

Las **cintas de alimentación** tienen la función de mover madera aserrada, residuos gruesos o finos, como chips y aserrín, de un punto a otro a una velocidad determinada. Es común encontrarlas en líneas de aserrado de *Pinus* spp. para el movimiento de las tablas desde la mesa de clasificación al baño antimancha. Asimismo, se emplean en el traslado subterráneo de productos secundarios hacia la clasificadora -cintas lisas-, y también para el traslado de chips y aserrín -cintas estriadas- desde la chipeadora y la clasificadora, respectivamente, hacia el sector de almacenaje (Figura 3.26).



Figura 3.26. Cintas de alimentación: (A) estriada en pendiente; (B) lisa horizontal-CTM.
Fuente: propia (2021).

Los **rodillos**, a diferencia de otros órganos de avance (cadenas y cintas), pueden cumplir tanto la función de **alimentación** como así también de **alimentación y fijación**. En ambos casos, tienen la función de mover las trozas, parte de ellas, madera aserrada o residuos de un punto a

otro a una velocidad determinada. En el caso de los rodillos de alimentación y fijación, permiten la sujeción de la pieza al mismo tiempo que el avance, evitando el descentrado de la pieza con respecto al órgano de corte. Son eficientes y de fácil construcción. Constan de un rodillo y de un resorte tensor. Pueden encontrarse asociados a cadenas para complementar el trabajo de movimiento y sujeción simultáneos.

Los rodillos se pueden clasificar de la siguiente forma:

- Según su posición: horizontal longitudinal, horizontal transversal, vertical o inclinado (entre 30 y 45° con la horizontal).
- Según su forma: cilíndrico o tronco-cónico (Figura 3.27).
- Según su superficie: liso, estriado, espiralado o helicoidal (Figura 3.28), con puntas endurecidas.



*Figura 3.27. Rodillo tronco-cónico en aserradero (Ubajay, Entre Ríos).
Fuente: propia (viaje de estudios Ing. Ftal., 2015).*



*Figura 3.28. Rodillos espiralados o helicoidales-CTM.
Fuente: propia (2020).*

Uno de los parámetros que caracteriza la performance de rodillos y cadenas, es la **productividad**, la cual se puede calcular con el empleo de la Fórmula 3.1 (INFOR, 1989):

$$P \left(\frac{\text{trozas}}{\text{turno}} \right) = \frac{T \times U \times n}{L_{tr}} \quad (3.1)$$

Donde: *P*: productividad, en trozas/turno; *T*: duración del turno de trabajo, en min; *U*: velocidad de avance, en m/min; *n*: aprovechamiento del tiempo de trabajo, en %; *L_{tr}*: longitud de la troza, en m.

Los **carros neumáticos** tienen la función de mover trozas o piezas parcialmente aserradas, desde la entrega del cargador a la sierra principal, y de acompañar el corte y retroceso de la pieza parcialmente aserrada. Poseen mecanismos especiales para orientar la troza y sujetarla, denominados escuadras y grapas, respectivamente (Figuras 3.29).

Se utilizan para el avance de la madera en rollo cuando la sierra principal es una sierra simple. Cuando son sierras dobles, se utilizan sistemas de cadenas de alimentación y rodillos de fijación.

En el carro neumático se diferencian 3 mecanismos (Figuras 3.29 y 3.30):

Mecanismo de avance y retroceso del carro: éste cuenta con rieles, ruedas y mecanismo de limpieza de las ruedas para que no descarrile ante la presencia de residuos en las vías. Dicho movimiento se realiza a través de un motor independiente del de la sierra principal, que lleva la energía al carro y lo hace mover por un sistema de cremalleras o por un cable de acero.

Mecanismo de movimiento transversal al eje del carro y de la troza: se realiza a través de las escuadras o colocadores que determinan el espesor de la pieza aserrada en el avance y retiran el remanente de la troza, para que la hoja de la sierra no se dañe en el movimiento de retroceso.

Mecanismo de fijación: consiste en un par de grapas o perros por cada colocador o escuadra, que son los encargados de mantener la troza firme sobre el carro a medida que avanza y corta. Junto al mecanismo de fijación, trabajan los *flaps*, que son sistemas que permiten cortar un menor espesor en la última pasada de la troza por la sierra, disminuyendo la distancia entre la escuadra y la punta de las grapas cuando se aliviana el peso de la troza.

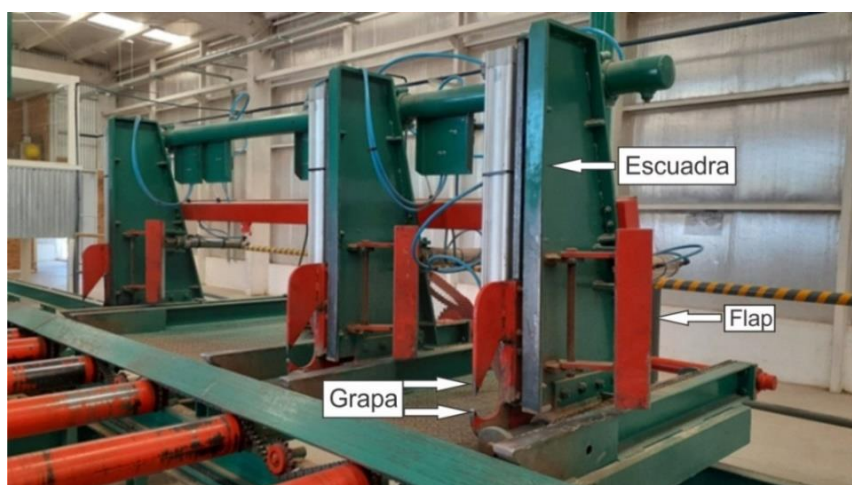


Figura 3.29. Carro neumático de 3 escuadras con flaps y grapas en posición de descanso-CTM. Fuente: propia (2020).



Figura 3.30. Grapas, flaps y volteadores en posición de trabajo-CTM.
Fuente: propia (2020).

La productividad de los carros neumáticos puede determinarse mediante el uso de la Fórmula (3.2) (INFOR, 1989):

$$P \left(\frac{\text{trozas}}{\text{turno}} \right) = \frac{T \times n}{t} \quad (3.2)$$

Donde: P : productividad, en trozas por turno; T : duración del turno de trabajo, en min; n : aprovechamiento del tiempo de trabajo, en %; t : tiempo para aserrar una troza, en min.

El tiempo total de aserrado de una troza (t) se calcula de la siguiente manera (Fórmula 3.3):

$$t \text{ (min)} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7 \quad (3.3)$$

Donde: t_1 : tiempo para montar el rollizo al carro (cargadores); t_2 : tiempo para fijar el rollizo (perros o grapas); t_3 : tiempo para centrar el rollizo a la sierra (escuadras); t_4 : tiempo de avance del carro (avance y corte); t_5 : tiempo de retroceso del carro (retroceso en vacío); t_6 : tiempo para girar la troza (volteadores); t_7 : tiempo para liberar el remanente del rollizo (grapas); todos los tiempos expresados en min.

Los tiempos de avance (Fórmula 3.4) y retroceso (Fórmula 3.5) se calculan de la siguiente manera:

$$t_4 \text{ (min)} = \frac{S \times z}{U_a} \quad (3.4)$$

$$t_5 \text{ (min)} = \frac{S \times z}{U_r} \quad (3.5)$$

Donde: t_4 : tiempo de avance, en min; t_5 : tiempo de retroceso, en min; S : carrera del carro, en m; z : número de cortes, adimensional; U_a : velocidad de avance, en m/min; U_r : velocidad de retroceso ($U_r: 1.5 \cdot U_a$), en m/min.

La carrera del carro se calcula para sierra circular y para sierra sinfín de acuerdo con las Fórmulas 3.6 y 3.7, respectivamente.

$$S \text{ (m)} = L_{tr} + D_s + 0,20 \quad (3.6)$$

$$S \text{ (m)} = L_{tr} + A_s + 0,20 \quad (3.7)$$

Donde: S : carrera del carro, en m; L_{tr} : longitud de la troza, en m; D_s : diámetro de la sierra circular (disco), en m; A_s : ancho de la sierra sinfín (hoja), en m.

El tiempo de los volteadores (Fórmula 3.8) se calcula de la siguiente manera:

$$t_6 \text{ (min)} = Z_1 \times n \quad (3.8)$$

Donde: t_6 : tiempo demandado para girar la troza, en min; Z_1 : tiempo demandado para dar un giro, en min; n : número de giros de la troza en el carro (según el plan de corte), adimensional.

Los **transfers**, también denominados **cambiadores de dirección de brazo** (Figura 3.31), cumplen la función de desviar 90° la dirección de trabajo de las piezas parcialmente aserradas, costaneros y/o cantos, permitiendo el rápido despeje de la línea de trabajo, trasladando la pieza a la máquina desdobladora, canteadora y/o reaprovechadora de costaneros gruesos.

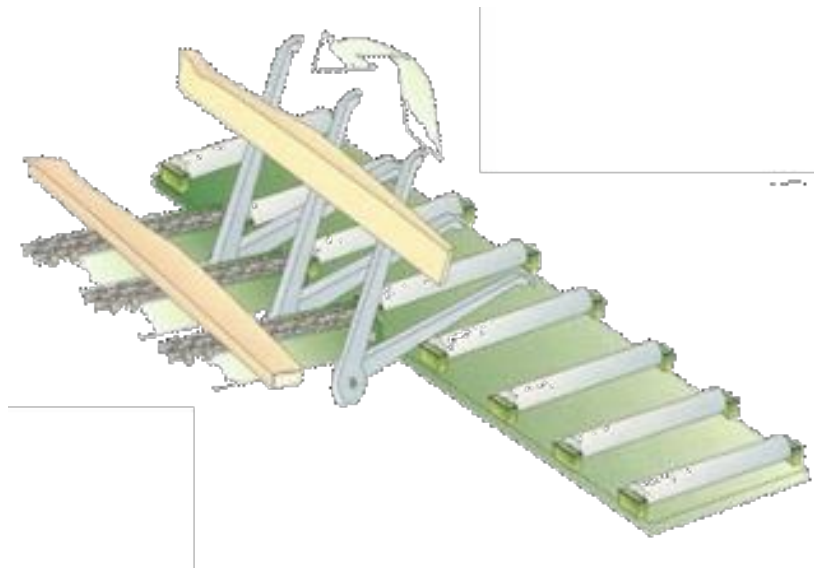


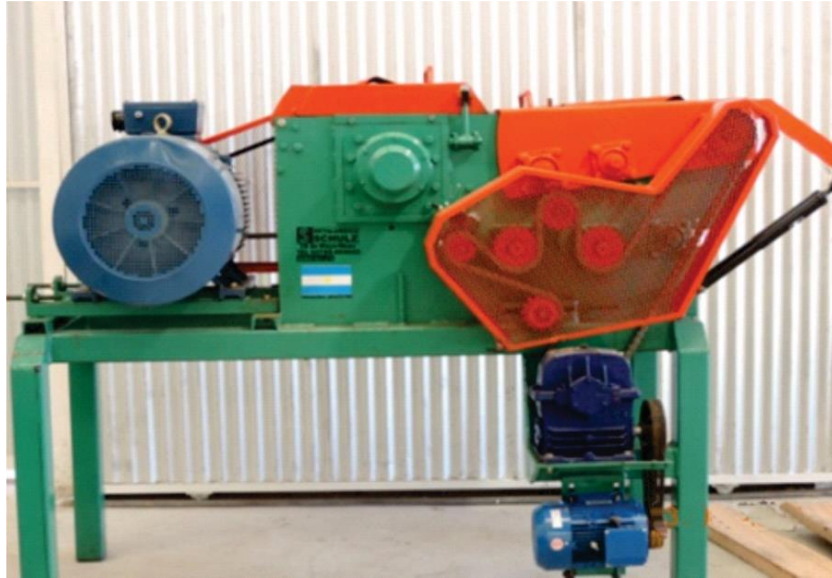
Figura 3.31. Esquema de trabajo de transfers.
Fuente: García Esteban et al. (2002).

Los **sistemas de clasificación de residuos** (Figura 3.32) generalmente se ubican en la línea de abastecimiento del astillador que se detallará posteriormente. Previo al astillado, los residuos finos, representados por el aserrín generado en las sierras, se separan de los residuos gruesos, constituidos por costaneros, cantos, despuntes y tablas defectuosas, atravesando una sección ranurada (visualizada en color naranja en la Figura 3.32). En esta parte del proceso, el aserrín pasa al depósito a través de cintas estriadas y el residuo grueso es llevado hasta la astilladora por cintas lisas.



*Figura 3.32. Clasificador de residuos del aserradero-CTM.
Fuente propia (2019).*

Los **chipeadores o astilladores** (Figuras 3.33 y 3.34), tienen por función transformar los costaneros, despuntes, cantos y tablas defectuosas en un producto secundario, denominado chip, con destino a bioenergía, industrias de tableros de partículas y/o fibras, pulpa para papel y/o cartón, entre otros. Están constituidos por un tambor (cilindro) giratorio provisto de cuchillas desmontables, ubicadas exteriormente de manera tangencial, que son las encargadas de chipear la madera a medida que ésta ingresa en forma perpendicular al eje del tambor. Una vez formado el chip en la astilladora, es trasladado al almacenamiento a través de cintas sinfín.



*Figura 3.33. Astillador de tambor del aserradero-CTM.
Fuente propia (2017).*



*Figura 3.34. Cinta transportadora de productos secundarios y astilladora puesta en servicio-CTM.
Fuente: propia (2019).*

El **sistema de almacenamiento de aserrín y chips** (Figura 3.35) tiene la función de almacenar por separado estos productos secundarios de distinta granulometría, para luego ser depositados en las cajas de los camiones que los trasladarán a su destino de uso.



Figura 3.35. Almacenamiento de aserrín (pila izquierda) y chips (pila derecha)-CTM.
Fuente propia (2021).

Los **sistemas de eliminación de residuos finos** tienen la función de eliminar rápidamente los residuos finos de la línea de producción de madera aserrada, aserrín y polvo de madera en suspensión, a fin de mantener un ambiente de trabajo saludable. Esto es realizado a través de ventiladores de aspiración, conductos y filtros.

Los **sistemas de mantenimiento de los elementos de corte** cumplen funciones tales como: afilar, trabar, recalcar, igualar, soldar y reparar el cuerpo de los elementos de corte; los mismos se encuentran ubicados en el taller de afilado del aserradero. El detalle de estos equipos se desarrollará en el Capítulo 4.

Asociado a los mecanismos complementarios, se presenta un proceso necesario para la optimización de la producción de madera aserrada. En el caso de *Pinus* spp., se identifica el **baño antimancha**. Este proceso se aplica en la madera recién aserrada para evitar el desarrollo de hongos de manchado o cromóforos. Según la Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC, 1988), estos hongos manchan la madera de dicha especie cuando se expone su albura húmeda al aire, por lo que, en aquellos aserraderos donde su capacidad de secado en horno no permite secar toda la producción, necesita contar con un sistema de baño antimancha. El mismo consta de bateas conteniendo un producto fungicida, colocadas al final del sistema de aserrado donde las tablas, por medio de cadenas, son forzadas a una inmersión total e instantánea (30 segundos) antes de su apilado con separadores para el secado al aire. Las tablas pueden sumergirse individualmente o armadas en paquetes con separadores y sunchados, los cuales se sumergen con montacarga en la batea (Figuras 3.36 y 3.37). El baño

antimancha persigue lograr una protección de baja residualidad, entre 4 y 6 meses, preservando la madera mientras se encuentre con un contenido de humedad superior al 20%.



Figura 3.36. Vista general de la batea de baño antimancha (Abra Ancha, Neuquén).
Fuente propia (viaje de estudios Ing. Ftal., 2018).



Figura 3.37. Proceso de inmersión en batea de baño antimancha (Abra Ancha, Neuquén).
Fuente propia (viaje de estudios Ing. Ftal., 2007).

Líneas de aserrado según tecnología, productividad y especies

Finalmente, a modo orientativo, se muestran algunas situaciones en base a la productividad y a los equipos que pueden encontrarse en el mercado local de madera aserrada.

Línea de aserrado para monte nativo, con una producción promedio de 4.000 pie²/turno; es factible encontrar este sistema en aserraderos antiguos de bajo nivel de tecnificación, generando productos de alto valor por la calidad de la materia prima, no por la calidad del aserrado. Es común encontrar estos aserraderos en el NOA y el NEA que involucran especies como cedro (*Cedrella angustifolia*), cebiles (*Anadenanthera* sp.; *Parapiptadenia* sp.), urunday (*Astronium balansae*), anchico (*Parapiptadenia rigida*), guatambú (*Balfourodendron riedelianum*), peteribí

(*Cordia trichotoma*), incienso (*Myrcarpus frondosus*), algarrobo blanco (*Prosopis alba*), quebracho colorado chaqueño (*Schinopsis balansae*), entre otros. Estos aserraderos básicamente cuentan con el siguiente equipamiento principal:

- Sierra sinfín principal simple de carro manual o mecánico.
- Desdobladora sinfín vertical simple (tableadora).
- Canteadora circular simple.
- Despuntadora circular simple de eje móvil.

En términos generales, los productos obtenidos cuentan con una clasificación manual y rudimentaria.

Línea de aserrado del CTM (Figura 3.38), con una producción promedio de 10.000 pie²/turno; apto para el aserrado de especies cultivadas. Líneas similares son factibles de encontrar en el NEA. Cuenta con el siguiente equipamiento básico:

- Sierra sinfín principal simple con carro neumático.
- Canteadora circular doble de un eje, que puede funcionar como desdobladora de piezas de hasta 3" de espesor.
- Mesa despuntadora con sierra circular simple de eje móvil.

La clasificación de los productos obtenidos se realiza en forma manual.

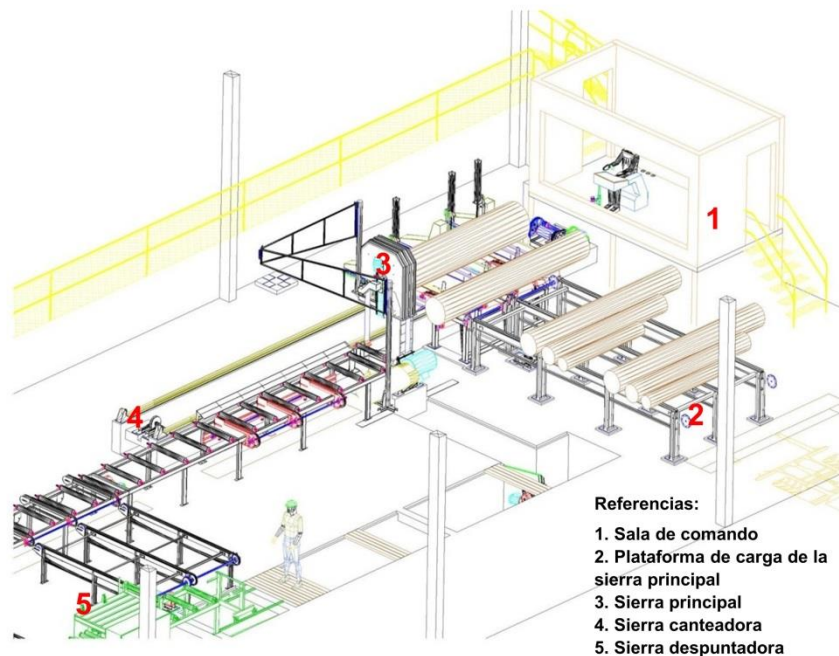


Figura 3.38. Esquema de la línea de aserrado-CTM.
Fuente: Proyecto CTM, UCAR (2014).

Línea de aserrado para coníferas o salicáceas, con producción promedio de 25.000 pie²/turno. En el caso de las coníferas, es común encontrar estos aserraderos en el NEA (*Pinus elliotii* y *P. taeda*) y en la provincia de Neuquén (*P. ponderosa*). En el caso de las salicáceas, se

pueden encontrar aserraderos de este tipo en el norte de la provincia de Buenos Aires, con madera proveniente del Delta Bonaerense (*Populus* spp.). Estos aserraderos cuentan con el siguiente equipamiento básico:

- Sierra sinfín principal simple con carro neumático.
- Desdobladora circular múltiple de uno o dos ejes.
- Desdobladora sinfín horizontal para aserrar los costaneros gruesos.
- Canteadora circular doble de un eje.
- Mesa despuntadora con sierra circular simple o doble de eje fijo.

La clasificación de los productos obtenidos se realiza en forma manual.

Línea de aserrado para coníferas o eucaliptos, con una producción promedio de 50.000 pie²/turno; es común encontrar estas líneas en las provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos aserrando *Pinus elliotii*, *P. taeda* y *Eucalyptus grandis*. Estos aserraderos cuentan con el siguiente equipamiento básico:

- Sierra sinfín principal doble o gemelas.
- Desdobladora circular múltiple de dos ejes.
- Desdobladora sinfín horizontal para aserrar los costaneros gruesos.
- Canteadora circular doble de un eje.
- Mesa despuntadora con sierras circulares dobles.

La clasificación de los productos obtenidos se puede realizar en forma manual o mecánica.

Nueva tecnología de aserrado, de producción superior a 250.000 pie²/turno, instalada en aserraderos de las provincias de Misiones y Corrientes (*Pinus elliotii* y *P. taeda*). Cuentan con sistemas tecnológicos más avanzados como el *chipper canter*.

Consideraciones finales

Todas las máquinas y equipos principales y complementarios antes descriptos forman parte del proceso de producción de madera aserrada a partir de un material tronco-cónico (troza-rolizo). De acuerdo con el tamaño y la tecnología de la planta de aserrado, será la complejidad de dichos equipos y sus funciones específicas. En aserraderos de menor tecnología, la ausencia de ciertos equipos y mecanismos de trabajo, afecta la calidad del producto, la productividad, el rendimiento, la eficiencia y la seguridad del personal durante el proceso de aserrado. Por el contrario, los aserraderos de tecnología avanzada maximizan y mejoran estos parámetros.

Referencias

- García Esteban, L.; Guindeo Casasús, A.; Peraza Oramas, C.; de Palacios de Palacios, P. (2002). *La madera y su tecnología*. Madrid, España: Ed. Mundi Prensa.
- INFOR. (1989). Principios de organización y operación del aserradero. Manual N°16. Concepción, Chile: Corporación de fomento a la producción.
- IRAM 9664. (2013). *Madera estructural: determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 9670. (2002). *Madera estructural: clasificación y requisitos. Clasificación en grados de resistencia para la madera aserrada de pinos resinosos (Pino elliotti y Pino taeda) del noreste argentino mediante una evaluación visual*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- JUNAC. (1988). *Manual del Grupo Andino para la preservación de la Madera*. (1ª Ed.). Lima, Perú: Junta del Acuerdo de Cartagena.
- JUNAC. (1984). *Manual de clasificación visual para madera estructural*. (1ª Ed.). Lima, Perú: Junta del Acuerdo de Cartagena.
- UCAR (2014). Proyecto Centro Tecnológico La Plata. Buenos Aires, Argentina: Unidad para el Cambio Rural, Ministerio de Agroindustria de la Nación.

CAPÍTULO 4

Proceso de aserrado: parámetros y factores que lo afectan

M. Mercedes Refort, Eleana M. Spavento y Gabriel D. Keil

Consideraciones generales

El propósito de cualquier industria de aserrado es aprovechar de manera eficiente la materia prima que se procesa en la misma. En términos generales, se considera que más del 45% del rollizo se transforma en productos secundarios, por lo cual, existe la necesidad de buscar alternativas frente a esta situación. Para ello, se debería recurrir a un proceso industrial sostenible y a un procesamiento integral de la materia prima, tratando en la medida de lo posible, de maximizar aquellos productos de mayor valor (vigas y tablas de buena calidad, de mayores escuadrías y largos), minimizando la cantidad de productos secundarios de menor valor, o bien, posibilitando su empleo en otros usos tales como el de bioenergía. En este sentido, al realizar una integración vertical de las actividades forestales (silvicultura-industria-mercado) se obtiene un uso eficiente de la madera con un mayor valor agregado de los productos obtenidos (González Soto, 2017).

Atendiendo a lo expuesto anteriormente, en el presente capítulo se detallarán los parámetros del proceso de aserrado y los factores que los afectan, debido a la importancia que estos representan para dicha integración.

Parámetros

A continuación se describirán los diferentes parámetros que intervienen en el proceso de aserrado.

El **rendimiento** se define como la relación porcentual entre el volumen resultante de productos aserrados y el volumen de madera rolliza (trozas) empleado para obtenerlos (Fórmula 4.1). Este término es también conocido como coeficiente de aserrío, coeficiente de conversión o factor de recuperación de madera (Baca Marín, 2001).

$$R (\%) = \frac{VM}{VT} \times 100 \quad (4.1)$$

Siendo: *R*: rendimiento, en %; *VM*: volumen de madera aserrada, en m³; *VT*: volumen de madera ro-
lliza, en m³.

Es uno de los parámetros determinantes para medir el funcionamiento de la industria de ase-
rrado, permitiendo a su vez, conocer las debilidades del proceso de transformación y realizar los
ajustes necesarios que conduzcan al alcance de una mayor industrialización forestal primaria.

En los aserraderos locales es común expresar este parámetro relacionando el volumen de madera
aserrada en pie cuadrados con el peso en toneladas de las trozas procesadas. Si bien es una medida
difundida en la foresto industria local, no es recomendable su uso ya que la medida de peso está
influenciada por la cantidad de agua que contenga al momento de tomar dicha medida, por lo que la
forma correcta de determinar el rendimiento es como se expresa en la Fórmula 4.1.

En la práctica, se requiere una planificación previa para la determinación del rendimiento,
siguiendo los pasos que se detallan a continuación:

- Determinar la muestra de trozas a analizar, debiendo ser representativa del total del lote.
- Identificar y clasificar por diámetro y/o calidad las trozas con las que se va a trabajar.
- Cubicar cada una de las trozas por algunos de los métodos analizados en el Capítulo 3.
- Identificar, clasificar y medir la madera aserrada por calidad, escuadría y longitud.
- Calcular el volumen de la madera aserrada según calidades y dimensiones.
- Calcular el rendimiento total y parcializado por calidades y escuadrías.

Para el cálculo del porcentaje de costaneros o lampazos generados durante el proceso de
aserrado, un método práctico es realizar el chipeado de los mismos, embolsar los chips y pesar-
los con un dinamómetro, previo tarado del bolsón vacío (Figuras 4.1 y 4.2).



Figura 4.1. Determinación de peso con dinamómetro.
Fuente: Propia (2019).



Figura 4.2. Muestras de chips.
Fuente: Propia (2019).

Para determinar en laboratorio la densidad de la madera chipeada, se toma una muestra, se la pesa teniendo en cuenta su contenido de humedad y se calcula su volumen por la técnica de desplazamiento de fluido (Figuras 4.3 y 4.4).



Figura 4.3. Peso de chips.
Fuente: propia (2019).



Figura 4.4. Determinación de volumen de chips.
Fuente: propia (2019).

La densidad se determina aplicando la Fórmula 4.2.

$$D \text{ (Kg/m}^3\text{)} = \frac{P}{V} \times 100 \quad (4.2)$$

Siendo: D : densidad, en Kg/m^3 ; P : peso al contenido de humedad determinado, en Kg ; V : volumen de chips al mismo contenido de humedad, en m^3 .

Luego, con el valor de la densidad obtenido en laboratorio y el peso del total de chips proveniente de los costaneros procesados, se obtiene el volumen de costaneros según la Fórmula 4.3.

$$V_c \text{ (m}^3\text{)} = \frac{P_c}{D} \quad (4.3)$$

Siendo V_c : volumen total de chips obtenidos de los costaneros, en m^3 ; P_c : peso total de chips, en Kg ;
 D : densidad, en Kg/m^3 obtenida mediante Fórmula 4.2.

Por último, para obtener el volumen de aserrín generado durante el proceso de aserrado, se realiza el cálculo según la Fórmula 4.4.

$$V_a \text{ (m}^3\text{)} = VT - VM - V_c \quad (4.4)$$

Siendo V_a : volumen de aserrín, en m^3 ; VT : volumen de las trozas procesadas, en m^3 ; VM : volumen de madera aserrada, en m^3 ; V_c : volumen de costaneros chipeados, en m^3 .

Asimismo, otros dos conceptos importantes relacionados con el rendimiento, son la productividad y eficiencia.

La **productividad** se determina en base al volumen de madera aserrada producida por unidad de tiempo, empleando la Fórmula 4.5.

$$P \text{ (pie}^2\text{/mes)} = VM \times T \times D \times 424 \quad (4.5)$$

Siendo: P : productividad mensual, en $\text{pie}^2\text{/mes}$; VM : volumen de madera aserrada, en $m^3\text{/hora}$; T : duración del turno, en horas; D : días de trabajo mensuales, adimensional; 424: coeficiente de conversión de m^3 a pie^2 , adimensional.

La **eficiencia** se determina en base a la relación entre el volumen de trozas procesadas en un día y el número de operarios involucrados en la producción, según la Fórmula 4.6.

$$E \text{ (m}^3\text{)} = \frac{VT}{O} \quad (4.6)$$

Siendo: E : eficiencia de la producción, en m^3 por operario y por día de trabajo; VT : volumen de trozas procesadas, en $m^3\text{/día}$; O : número de operarios involucrados para procesar VT , adimensional.

En base a los conceptos antes mencionados, este capítulo se centrará en los principales factores que afectan el rendimiento y por consecuencia también afectarán la productividad y la eficiencia de aserrado.

Factores

Los seis factores que serán desarrollados son **materia prima, equipamiento, procesos, productos, personal y mantenimiento de los elementos de corte**.

Materia prima

Este factor considera el tamaño (diámetro y longitud), la forma y la calidad de las trozas.

Tamaño de la troza

Diversos autores indican que el diámetro de la troza es uno de los factores de mayor incidencia en el aserrado, demostrándose en la gran mayoría de las experiencias, que en la medida que

el diámetro aumenta también se incrementa el rendimiento de las trozas (Acevedo Correa, 2014; Arreaga Morales, 2007; Aguilar Cayún & Sanhueza Bravo, 2003). Lo antes mencionado, pone de manifiesto la importancia de garantizar, en lo posible, un mayor desarrollo de las existencias maderables de grandes dimensiones y mejor calidad, destinadas a los aserraderos, tomando en consideración, las limitaciones de tamaño de procesamiento de las trozas dada por el tipo de equipamiento disponible para procesarlas.

El rendimiento de las trozas en el proceso de aserrado es afectado por la longitud, la cual a su vez, está asociada a la conicidad de las mismas (Figura 4.5, Fórmula 4.7).

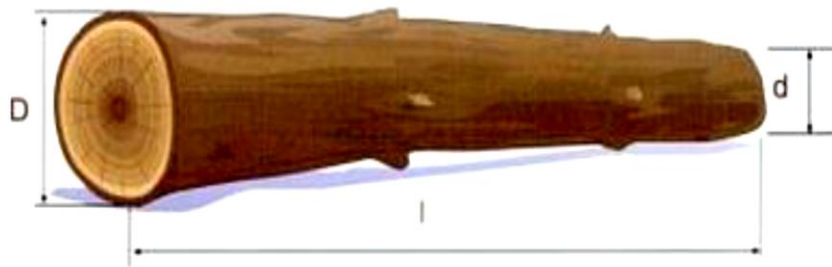


Figura 4.5. Conicidad de una troza.
Fuente: Acevedo Correa (2014).

$$\text{Conicidad} = \frac{D - d}{l} \quad (4.7)$$

Siendo: *D*: diámetro máximo, en mm; *d*: diámetro mínimo, en mm; *l*: longitud, en m.

En términos generales, a mayor longitud, mayor conicidad, lo cual dificulta obtener rendimientos semejantes en volumen y calidad en todo el largo de la troza. Asimismo, hay que considerar que la forma es influenciada por la especie, las condiciones de crecimiento (sitio y clima) y el manejo silvicultural.

Calidad de la troza

La calidad de las trozas es otro de los factores a tener en cuenta. En este caso, deben considerarse las curvaturas (Figura 4.6, Fórmula 4.8), grados de ataques de insectos u hongos, como así también sus características intrínsecas (propias de su crecimiento), la presencia de madera de reacción, médula incluida, nudos, entre otras. A medida que estas particularidades afectan en mayor proporción a la troza, se produce una importante reducción del rendimiento, comparado con trozas de mayor rectitud y calidad.

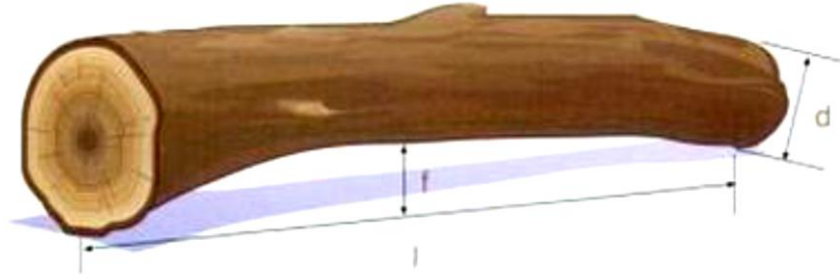


Figura 4.6. Curvatura de una troza.
Fuente: Acevedo Correa (2014).

$$\text{Curvatura} = \frac{f}{l} \quad (4.8)$$

Siendo: *f*: flecha, en mm; *l*: longitud, en m.

De acuerdo con lo expresado, se considera de importancia la aplicación de tratamientos silviculturales en las plantaciones que se van a destinar a la industria del aserrado, como así también la clasificación y cubicación de las trozas previo al aserrado, lo cual también influirá y definirá el sistema de corte a utilizar.

Equipamiento

Este factor influye en el rendimiento según el tipo de sierras ya desarrolladas en el Capítulo 3, y de acuerdo con ello, según el ancho de corte de la sierra y la variación del corte.

Ancho de corte

El ancho de corte, o también denominado *kerf*, se define como la cantidad de material que la herramienta de corte va a retirar de la madera. Este parámetro influye sobre el rendimiento de madera aserrada ya que una vía de corte ancha se traduce en mayores pérdidas de madera en forma de aserrín. Esto también provoca una disminución de la eficiencia de la maquinaria, dado que influye de forma directa en la potencia de corte empleada, o sea, a menor ancho de corte, menor potencia requerida.

Existen dos tipos de ancho de corte, uno teórico y otro real o práctico, los cuales se esquetizan en la Figura 4.7.

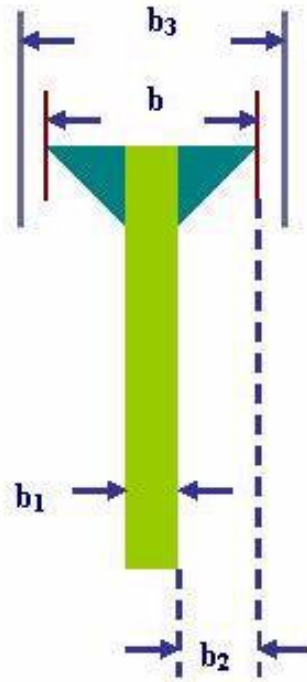


Figura 4.7. Esquema de los canales de corte, teórico (b) y práctico (b_3).
Fuente: Aguilar Cayún & Sanhueza Bravo (2003).

Ambos tipos de ancho de corte se calculan atendiendo a las Fórmulas 4.9 y 4.10.

$$\text{Ancho de corte teórico } (b) = b_1 + b_2 \quad (4.9) \quad \text{Ancho de corte práctico } (b_3) = b + (b_3 - b) \quad (4.10)$$

Siendo: b : canal de corte teórico, en mm; b_1 : espesor de la hoja, en mm; b_2 : dimensión del proceso de ensanchamiento del diente, trabado o recalado, en mm; b_3 : ancho de corte real o práctico, en mm; $b_3 - b$: irregularidades del corte real, en mm.

Las variaciones que influyen en el ancho de corte, en general, son aquellas relacionadas al mantenimiento de los equipos, al tipo de máquina/sierra y a las vibraciones producidas durante el corte propiamente dicho.

El canal de corte teórico (b), varía según el tipo de maquinaria/sierra empleada para el corte, en rangos como los indicados a continuación:

- **Sierra sinfín:** de 2,8 a 3 mm.
- **Sierra circular:** 5,6 a 8 mm.
- **Sierra alternativa:** de 3,2 a 3,6 mm.

Asimismo, depende de varios factores relacionados con el procesamiento de transformación de la madera; por ejemplo, a mayor velocidad de alimentación y/o ante la presencia de una sierra con deficiente mantenimiento, se genera un mayor canal de corte por las vibraciones que se producen durante el aserrado. En cuanto a las características de la madera, la densidad incide de manera inversa, esto es, a mayor densidad, el canal de corte disminuye.

En lo que respecta al espesor de la hoja de la sierra (**b₁**), es considerado un componente definitorio del ancho de corte teórico y, a medida que éste aumenta, disminuye el rendimiento. Al igual que lo mencionado anteriormente, este parámetro también depende del elemento de corte/tipo de sierra utilizada:

- **Sierra sinfín:** el espesor se calcula en función del diámetro de los volantes, por lo tanto en sierras con volantes de gran diámetro, se montan hojas de mayor espesor.
- **Sierra circular:** a mayor diámetro aumenta su espesor. Por ello, no es recomendable este tipo de sierras como sierra principal, ya que requieren de discos de grandes diámetros con gran espesor de cuerpo para mantener la estabilidad durante el corte.
- **Sierra alternativa:** a mayor longitud de sierra y mayor velocidad, mayor espesor.

En relación al proceso de ensanchamiento aplicado en los dientes de la sierra (**b₂**), este parámetro variará de acuerdo a si se aplica un proceso de trabado o de recalcado. El **trabado** consiste en el doblado de los dientes para uno y otro lado del cuerpo de la sierra, cuya función es separar el ancho de la zona de corte del ancho del cuerpo de la sierra, para que la madera no roce en él durante el proceso de corte y avance. Por otro lado, el **recalcado** consiste en el ensanchado del diente dado por el aplastamiento de su punta para que éste sea más ancho que el cuerpo de la sierra. Ambos tipos de modificaciones del diente dependerán de: la densidad de la madera (las especies más duras necesitan menos trabado); el grupo de especies (las coníferas necesitan más trabado que las latifoliadas); la humedad de la madera (las maderas más húmedas necesitan más trabado que las maderas más secas); el contenido de resina (las especies con altos contenidos de resina requieren mayor trabado); la temperatura (las maderas más heladas requieren un menor trabado); el ancho de los anillos (las maderas con anillos más anchos requieren mayor trabado); el espesor de la hoja de la sierra (las hojas angostas requieren menor trabado); la velocidad de alimentación porque requieren sacar gran volumen de aserrín en menor tiempo (mayores velocidades demandan mayor trabado). Por su parte, el valor de recalcado depende de otros factores; por ejemplo, en presencia de una madera más blanda, resinosa, fibrosa y húmeda, el valor del recalcado será mayor, a modo de reducir la fricción de las fibras de la madera que se proyectan a partir de la superficie recién aserrada. Asimismo, este valor aumenta cuando la máquina o la sierra presentan imperfecciones que se traducen en una mayor imprecisión de corte.

Por último, la desviación del corte de la sierra es producto de las irregularidades (**b_{3-b}**), generadas por las vibraciones de la hoja durante el corte. Dichas irregularidades están en función de la longitud libre de la sierra, siendo variable según cada tipo de sierra:

- **Sierra sinfín:** la longitud libre queda establecida por la distancia entre la guía inferior fija y la guía superior móvil ascendente-descendente.
- **Sierra circular:** la longitud libre la determina la distancia entre el borde externo del collarín y la periferia del disco; es menor que el radio del disco.
- **Sierra alternativa:** la longitud libre se define por la distancia entre el registro inferior fijo y el superior móvil ascendente-descendente.

Por lo tanto, este ancho debido a las irregularidades en el corte será más estrecho en sierras más rígidas con menos vibraciones, donde el avance o carrera es más parejo, como así también cuando el corte presente mayor precisión.

Variación en el corte

La variación en el corte se debe a que tanto la troza como la sierra no se mueven de manera rectilínea, originando variaciones en las dimensiones del producto obtenido, con la consecuente pérdida de rendimiento.

Procesos

Los factores relativos al proceso son considerados de gran importancia en cuanto al rendimiento del proceso de aserrado. Entre ellos, se considerarán como aspectos más importantes, el tronzado y los patrones de corte.

Tronzado

El tronzado del rollizo, es decir el dimensionamiento en longitud, es de gran importancia, ya que una longitud superior a la que se utilizará o una longitud inferior a la necesaria, redundaría en una pérdida muy importante del producto final. Además se pierde en productividad, ya que se emplea más tiempo si se tronza por exceso (mayor longitud que la medida comercial del producto requerido), disminuyendo significativamente el rendimiento.

Patrones de corte

El patrón de corte, también conocido como esquema, sistema, plan o diagrama de corte, es la manera en que se asierra el rollizo para producir madera aserrada de distintas escuadrías y largos, de manera tal de obtener, en el menor tiempo posible, el mayor rendimiento en cuanto a volumen y calidad.

En todo sistema, la localización del primer corte de apertura, tanto en el rollo como en la basa (elemento central escuadrado que se obtiene después de retirar los costaneros de la troza), es la clave para obtener el máximo rendimiento. Un esquema de corte que incluya mayor cantidad de cortes en la troza produce mayor cantidad de aserrín y por lo tanto, reduce el rendimiento.

Las herramientas computarizadas buscan la optimización de los patrones de corte, mediante la automatización de los procesos. A través de estos programas se mejora la planificación de la producción, garantizando la minimización de los niveles de desperdicios y los tiempos de producción, permitiendo optimizar la calidad del producto (Catrinahuel Montenegro & Beltrán Tiznado, 2006). Asimismo, para lograr esta automatización de manera eficiente, es importante realizar las actividades en la playa de trozas que fueron abordadas en el Capítulo 2, debido a que estas características influirán directamente en los esquemas de corte a programar.

Por lo tanto, los sistemas de corte, dependerán, entre otras consideraciones, del nivel de equipamiento del aserradero (máquinas principales y desdobladora, Capítulo 3).

La variedad de combinaciones de maquinarias utilizadas para obtener madera aserrada es muy amplia y diversa, cada una con sus características particulares. En la Tabla 4.1, se presentan posibles combinaciones de sierras y sistemas de corte.

SIERRAS			SISTEMAS DE CORTE
Tipo	Función		
	Principal	Desdobladora	
Sinfín	Vertical simple	Vertical simple	Tangencial-Radial-Paralelo al eje-Individual o abierto- C/defectos y tensiones
	Vertical doble	Vertical doble	Tangencial-Paralelo al eje-Individual o abierto. C/tensiones.
	Vertical doble	Horizontal simple	Tangencial-Paralelo al eje-Individual o abierto
		Horizontal doble	Tangencial-Paralelo al eje-Simultáneo o cerrado
		Horizontal cuádruple	Tangencial-Paralelo al eje-Simultáneo o cerrado
		Horizontal séxtuple	Tangencial-Paralelo al eje-Simultáneo o cerrado
Circular	Simple	Simple	Tangencial-Radial-Paralelo al eje y a la generatriz-Individual o abierto- C/defectos y tensiones
	Doble de 1 eje	Múltiple de 1 eje	Tangencial-Paralelo al eje-Simultáneo o cerrado- C/tensiones
	Doble de 2 ejes	Múltiple de 2 ejes	Tangencial-Paralelo eje-Simultáneo o cerrado- C/tensiones
Alternativa	Vertical múltiple	Vertical múltiple	Tangencial-Paralelo al eje-Simultáneo o cerrado
Chipeadora canteadora	Chipper Canter	Múltiple	Tangencial-Paralelo al eje-Simultáneo o cerrado
Perfiladora	Equipo perfilador		Tangencial-Paralelo al eje-Simultáneo o cerrado

Tabla 4.1. Combinaciones de sierras y posibles sistemas de corte.
Fuente: propia (2019).

A continuación se describen algunos de los sistemas de corte más utilizados en los aserraderos, como así también el sistema de corte de los equipos de *chipper canter* y perfiladora.

- **De acuerdo a la cantidad de cortes por pasada**

Individual o abierto: en este tipo de aserrado, en cada pasada de la troza por la sierra, se obtiene sólo una pieza aserrada (tabla o tablón). Para obtener una segunda pieza, la troza debe pasar otra vez por el elemento cortante, y así sucesivamente. En este tipo de aserrado las superficies quedan a la vista, y dependiendo de su calidad, se puede decidir sobre el espesor que se le dará a la pieza en el siguiente corte. Por esta razón, este método de aserrado es también conocido como abierto y se utilizan máquinas principales que cuentan con una sierra simple y el avance se realiza con carro. Este sistema es considerado importante en aserraderos de especies nativas o en aserraderos donde sólo tienen, como sierra principal, una sierra circular o una sierra sinfín, actuando además como máquina desdobladora (INFOR, 1989). Éste es el caso del CTM (Figuras 4.8 y 4.9).



*Figura 4.8. Aserrado por sistema de corte abierto-CTM.
Fuente: Propia (2019).*



Figura 4.9. Costanero aserrado-CTM.
Fuente: Propia (2019).

Masivo o cerrado: en este caso, la troza pasa una sola vez por la sierra, obteniéndose diversas piezas con espesores iguales o variados en esa única pasada. Normalmente, las tablas deben cantearse en una máquina secundaria para eliminar el canto muerto y obtener el ancho final de la pieza. En este tipo de aserrado no existe la posibilidad de observar la superficie de corte y los defectos internos que pudiera tener la troza. De acuerdo con esto, este sistema es también conocido como cerrado; la clasificación por calidad se debe efectuar después del aserrado. Este esquema se realiza con máquinas alternativas, circulares múltiples o grupos de sierras sin fin (en tándem), presentando un rendimiento mayor que el sistema individual anteriormente descrito (INFOR, 1989).

- **De acuerdo a la dirección de avance de la troza**

Por el eje de la troza: en este tipo de aserrado los cortes se realizan en forma paralela al eje longitudinal de la troza. Las piezas se obtienen con veta atravesada, producto de la conicidad del rollizo (INFOR, 1989).

Por la generatriz de la troza: es el aserrado que se realiza paralelo a la corteza de la troza. Las piezas se obtienen con veta recta al inicio del aserrado y veta atravesada cuando se llega al lado opuesto de la troza, producto de la conicidad del rollizo (INFOR, 1989).

- **De acuerdo al tipo de madera obtenida**

Aserrado de madera floreada y cuarteada: con este tipo de sistemas se busca obtener madera con una clara diferencia en sus caras tangenciales o radiales, por lo que, el rollizo se puede aserrar tangente a los anillos de crecimiento (madera floreada, Figura 4.10), o radialmente a ellos (madera cuarteada, Figura 4.11).

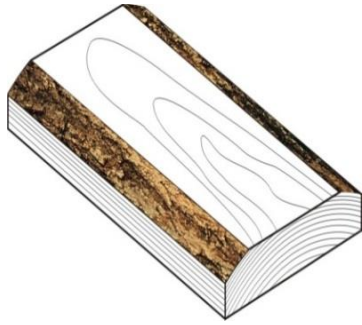


Figura 4.10. Aserrado de madera floreada.
Fuente: Spavento (2015).



Figura 4.11. Aserrado de madera cuarteada.
Fuente: Spavento (2015).

El corte tangencial es el que se aplica mayormente por su simplicidad; requiere menor tiempo de aserrado y se obtiene mejor aprovechamiento. Asimismo, el vetado resultante de los anillos de crecimiento es atractivo y notorio, mientras que en el proceso de secado presenta menor contracción en el espesor.

El corte radial implica una mayor complejidad, lo que disminuye sensiblemente el rendimiento del proceso y lo hace costoso, por lo que se aplica sólo para pedidos y usos especiales, tales como pisos de madera, por ser un corte de mayor estabilidad dimensional. En este sentido, la madera radial presenta menor contracción en el ancho de la pieza, es menos propensa a los defectos de forma y de estructura que se pudieran ocasionar durante el proceso de secado y posterior uso de la pieza; además, su vetado debido a los radios leñosos puede ser notorio y atractivo en algunas especies (Bach. Huarcaya de la Cruz, 2011; INFOR, 1989). Las consideraciones vinculadas a los defectos de forma y estructura serán desarrolladas con mayor detalle en el Capítulo 5.

A modo de ejemplo, a continuación se presentan algunas posibilidades de combinaciones de sierras y esquemas de corte (Figuras 4.12 y 4.13).

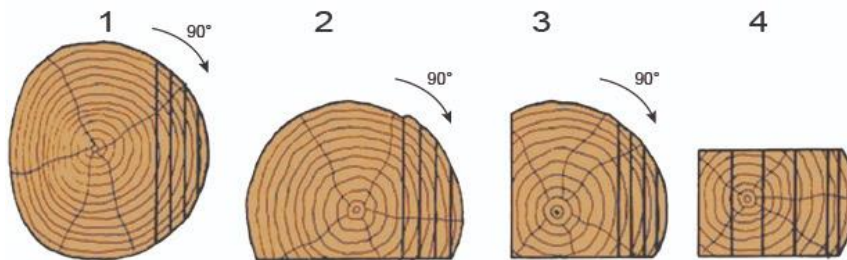


Figura 4.12. Sistema de corte con sierra simple como máquina principal y desbobladora.
Fuente: adaptada de INFOR (1989).

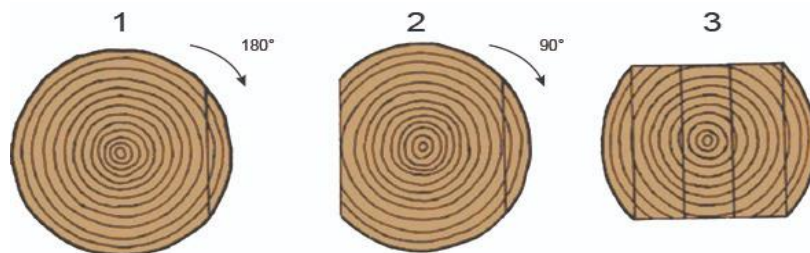


Figura 4.13. Sistema de corte con sierra simple y desbobladora múltiple.
Fuente: adaptada de INFOR (1989).

- **De acuerdo al uso de equipos y/o técnicas especiales**

Sistema de corte con chipeadora-canteadora: a diferencia del aserrado tradicional, la técnica de *chipper canter* se caracteriza por chipear los costaneros a medida que se van separando de la basa central escuadrada. La viga o basa central luego debe ser desdoblada en tablas, generalmente en sierras circulares múltiples de dos ejes (Figura 4.14). En el aserrado tradicional, los primeros cortes se realizan para separar los costaneros, que luego son reaprovechados para la obtención de tablas más angostas y cortas, mientras que el remanente del costanero fino es chipeado por la astilladora.

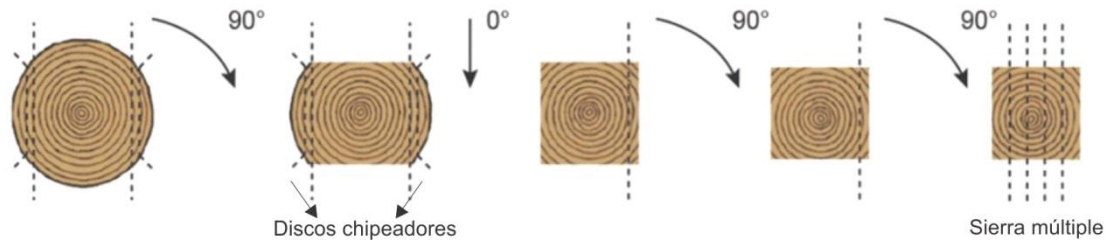


Figura 4.14. Sistema de corte con *chipper canter* y sierra circular múltiple.
Fuente: adaptada de Aguilar Cayún & Sanhueza Bravo (2003).

Sistema de corte con perfiladora: un detalle resumido del proceso es esquematizado en la Figura 4.15. A diferencia del aserrado tradicional y del mismo modo que en el *chipper canter*, las tablas salen canteadas, con la diferencia que en la perfiladora los costaneros gruesos se aprovechan para obtener tablas canteadas; en el *chipper canter* se chipea mayor volumen de madera, obteniéndose un rendimiento menor en madera aserrada con respecto al perfilado.

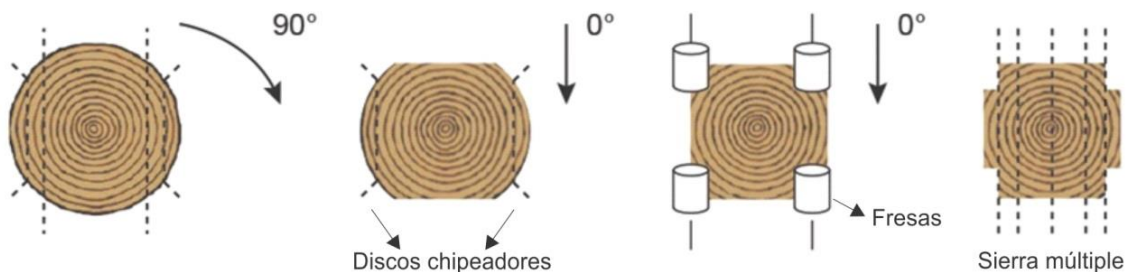


Figura 4.15. Sistema de corte con perfiladora (resumido).
Fuente: adaptada de Aguilar Cayún & Sanhueza Bravo (2003).

El proceso, detallado en la Figura 4.16, se inicia con la medición tridimensional de la troza (1) y el chipeado de dos costaneros, produciendo un núcleo con dos caras aplanadas o semibasa (2); posteriormente, la troza es girada a 90° (3) y se realiza el segundo aplanamiento con los discos chipeadores, produciendo un núcleo con cuatro caras aplanadas, pero aún con presencia, en parte, de canto muerto (4); la troza aplanada en 4 caras, es girada (opcional) (5) y medida tridimensionalmente para establecer los cortes sucesivos (6); seguidamente pasa por fresas que realizarán el canteado de las futuras tablas, proceso también denominado perfilado (7); a continuación se aserran, con sierras circulares dobles de dos ejes, y separan (8, 9); se realiza un nuevo girado de la troza (10) y se fresan (perfilan) los otros dos cantos (11); por último se realiza

el aserrado, con sierras circulares múltiples de dos ejes, de las tablas laterales canteadas y de la viga central obtenida, en tablas y/o tablonés (12).

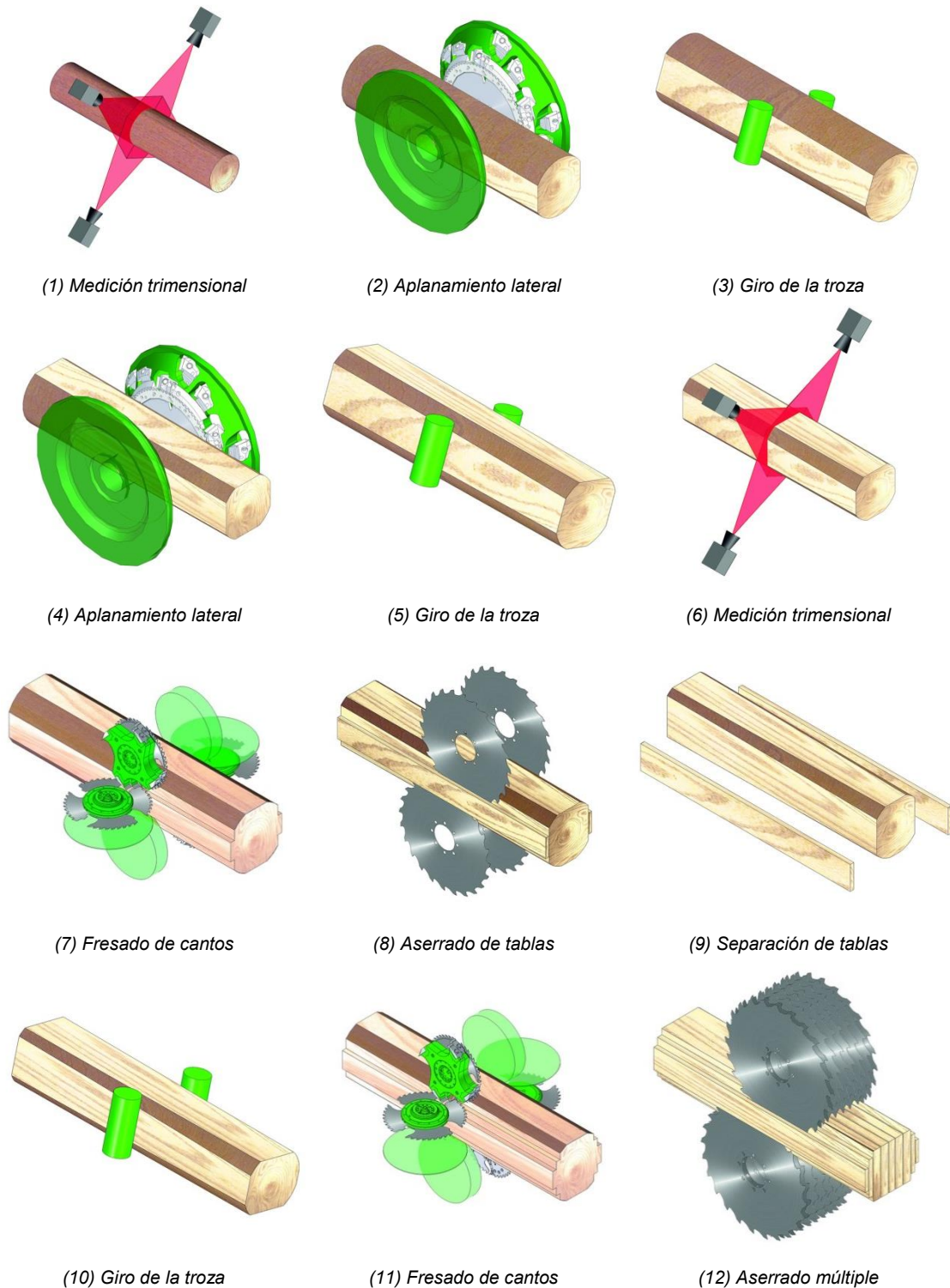


Figura 4.16. Sistema de corte con perfiladora (ampliado).
Fuente: Linck (2021)¹⁶.

¹⁶ <https://www.linck.com/es/inhalt/technologien/profilieretechnik.html>

Productos

Otro factor a considerar es la calidad del producto. En este sentido, de acuerdo a la ubicación de donde se obtiene la madera aserrada, se pueden clasificar en: madera lateral, semilateral y central. Cuando las piezas son obtenidas de la periferia de la troza se denominan maderas laterales (Figura 4.17, color verde) y se caracterizan por ser maderas libres de nudos en ejemplares podados, con una cantidad de defectos poco relevantes. Esta madera tiene un alto valor económico y está orientada a la industria de remanufactura (temática que se desarrollará en el Capítulo 5). La madera que le sigue a la anterior, desde la periferia de la troza hacía el interior, se denomina madera semilateral (Figura 4.17, color naranja); al igual que la anterior, se encuentra orientada a la industria de remanufactura, aunque la diferencia es que ésta presenta una mayor cantidad de nudos y defectos, siendo el rendimiento menor debido a que deben eliminarse los mismos para obtener el producto final. Por último, le sigue la madera central (Figura 4.17, color amarillo), la cual es obtenida de la parte central de la troza y se caracteriza por presentar la mayor cantidad de nudos y principalmente por la presencia de medula que restringe su uso estructural, especialmente en especies latifoliadas. Está orientada a la industria de la construcción, y sujeta, al igual que las anteriores, a restricciones de escuadría, calidad y mercado (Bach. Huarcaya de la Cruz, 2011; Aguilar Cayún & Sanhueza Bravo, 2003).

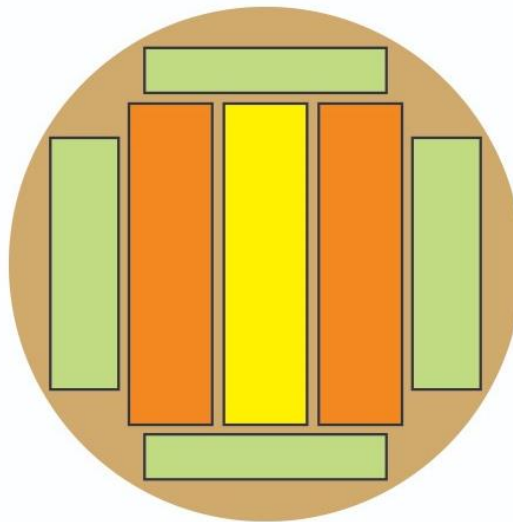


Figura 4.17. Tipos y calidades de productos.
Fuente: adaptada de Bach. Huarcaya de la Cruz (2011).

Eficiencia del personal

Este factor hace referencia especialmente a los responsables de las máquinas principales, reaserradoras, canteadoras y al personal del taller de afilado, ya que, a nivel de dirección y/u operación, el grado de conocimientos teórico-práctico que el personal tenga de los elementos que intervienen en el proceso, son de vital importancia durante el aserrado.

En este sentido, ante la naturaleza heterogénea de la materia prima, obliga a que el personal posea idoneidad para tomar decisiones rápidas. Ésto, sumado al desconocimiento de los procesos, descuidos por falta de concentración, cansancio o estado de salud no apto, pueden ser la causa de decisiones erróneas, con la consecuente repercusión negativa en el rendimiento. Por ello, la predisposición de trabajo y la producción tiene dos orígenes, uno de tipo natural y consecuencia del estado de salud, edad, higiene, alimentación, etc.; y otro, en el plano personal y anímico de cada operario.

Por lo antes mencionado, la capacitación continua como las condiciones aptas y confortables de trabajo, resulta en mejoras de los procesos productivos, como así también en mayor aprovechamiento de la madera, mayor productividad, seguridad de las operaciones, ingreso económico y satisfacción de los clientes.

Mantenimiento de los elementos de corte

El último factor a analizar que repercute en el rendimiento está relacionado con las condiciones y el mantenimiento de la maquinaria, equipo y accesorios de corte. Ello contempla su conservación, en condiciones adecuadas de uso, durante toda la vida útil. En general, se efectúa para que operen y funcionen en condiciones normales de calidad, dentro de los estándares de producción. Entre los problemas identificados en el proceso de aserrado, relacionados a las herramientas de corte, se pueden mencionar: dientes afilados en forma despareja o desafilados, pérdida de dientes, uso inadecuado del tipo de sierra, pérdida de tensión en las sierras, excesiva o deficiente velocidad de corte, mal estado de las guías en el caso de sierras sinfín, abolladuras y/o quemaduras en el cuerpo del disco en el caso de sierras circulares, entre otros. Todo ello, conlleva a una merma de rendimiento originando pérdidas económicas e imagen comercial deficiente.

Existen dos tipos de mantenimiento: el preventivo y el correctivo. El primero se considera el más importante y la razón de ser del mantenimiento de las maquinarias, las instalaciones y los accesorios de trabajo, mientras que el segundo, sólo corrige las anomalías o accidentes de trabajo que se presentan repentinamente durante el proceso de producción e interrumpen las actividades total o parcialmente (Sánchez Rojas, 2008).

Dentro del tipo de mantenimiento preventivo, el de las sierras es primordial para el correcto funcionamiento de los aserraderos, ya que incide directamente en la calidad y costo del producto.

Debido a que las sierras sinfín y las sierras circulares presentan diferentes elementos de corte, esta sección se divide atendiendo a cada una de ellas de manera independiente para un mejor entendimiento de las actividades de mantenimiento.

Mantenimiento de sierras sinfín

La mayor o menor vida útil de la herramienta de corte será afectada por una serie de factores relacionados a la especie de madera con la que se está trabajando, al proceso y a su mantenimiento. En relación a esto último, para realizar las actividades vinculadas a las sierras sinfín se requiere que el taller de afilado sea espacioso (debido a las dimensiones de las sierras), bien

iluminado y aislado de ruidos y viento, y en lo posible, que se encuentre ubicado en cercanía de la línea de aserrado (Figura 4.18). Para ello, debería contar con los siguientes equipos y accesorios: guillotina, biseladora, troqueladora, máquina automática de recalcado e igualado, banco de aplanado y equipo de laminado o tensionado, equipo de soldar, máquina de afilado automática, reglas de tensión, etc. (Sánchez Rojas, 2008).



Figura 4.18. Taller de afilado (Abra Ancha, Neuquén).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2018).

A continuación, se detallan los elementos constitutivos de las sierras sinfín, con el objetivo de poder entender las diferentes operaciones que se realizan en ella para su correcto funcionamiento. Consta de dos partes: dentadura y cuerpo. La dentadura está constituida por un número determinado de dientes y es la encargada de realizar el corte en la madera. El cuerpo es el soporte de la dentadura y es la parte de la sierra que se acopla y adapta a las volantes (Figura 4.19); en conjunto definen el ancho de la cinta (CITEMadera, 2011).

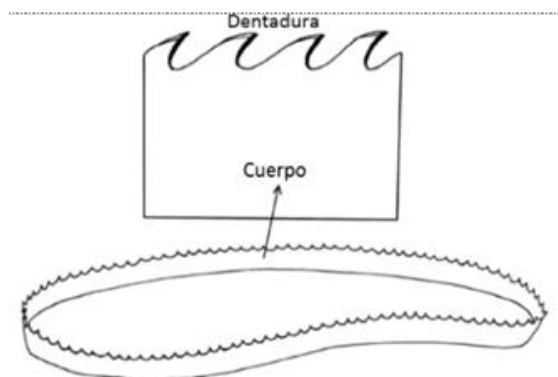


Figura 4.19. Partes de una sierra cinta.
Fuente: CITEMadera (2011).

Además del ancho, se deben considerar el espesor y la longitud de la sierra. El espesor está determinado por el diámetro de los volantes y permite lograr un adecuado tensado y precisión en el corte; se considera que el espesor máximo debe ser igual a la milésima parte del diámetro del volante. La longitud de la sierra es aquella que permite rodear los volantes superior e inferior para su correspondiente tensado (CITEmadera, 2011).

Las tres dimensiones de las cintas de la sierra sinfín antes mencionadas, ancho, espesor y longitud, están en función de la máquina donde van montadas.

El **ancho** de la sierra se define de acuerdo con la Fórmula 4.11:

$$A \text{ (mm)} = AV + h \text{ diente} + \text{régimen} \quad (4.11)$$

Siendo: A: ancho de sierra, en mm; AV: ancho de los volantes, en mm; h diente: altura del diente, en mm; régimen: distancia e/borde del volante y garganta del diente (5-8 mm), en mm.

El **espesor** de la sierra se determina según la Fórmula 4.12:

$$E \text{ (mm)} = \frac{\theta v}{1000} \quad (4.12)$$

Siendo: E: espesor, en mm; θv : diámetro de los volantes, en mm. A partir de E es posible estimar la altura del diente (h), considerando para ello el espesor (E) aumentado 8 o 10 veces, en mm.

La **longitud** de la sierra se calcula a partir de la Fórmula 4.13:

$$L \text{ (m)} = (\theta v \times \pi) + (\text{distancia e/ ejes volantes} \times 2) \quad (4.13)$$

Siendo: L: longitud de la sierra, en m; θv : diámetro de los volantes, en mm; π : 3,141516; distancia e/ejes volantes: distancia máxima-50 mm, en mm.

Los dientes forman la parte de la cinta que corta la madera. En el diente de la sierra sinfín se reconocen las siguientes partes: lomo, punta y garganta (Figura 4.20). Asimismo, el ángulo de corte, denominado C en la figura, debe ser escogido de acuerdo a la especie maderera, las velocidades de corte y de alimentación, y el tipo y forma del diente (CITEmadera, 2011; Cuenca García, 2006).

La distancia entre el fondo de la garganta y la punta del diente se denomina altura, y la distancia entre la punta de dos dientes consecutivos se denomina paso (Figuras 4.20 y 4.21). Se recomienda que el paso del diente sea mayor para maderas blandas y menor para maderas duras, ya que la generación de aserrín es mayor en las primeras (CITEmadera, 2011). A continuación se detallan algunas medidas de paso del diente (d) y ángulo de corte (C) según el tipo de maderas y tipo de diente, respectivamente:

- Maderas duras: d=35 mm.
- Maderas semiduras: d=40 mm.

- Maderas blandas: $d=45$ mm.
- Dientes recalcados: $C=18-20^\circ$.
- Dientes trabados: $C=5-10^\circ$.

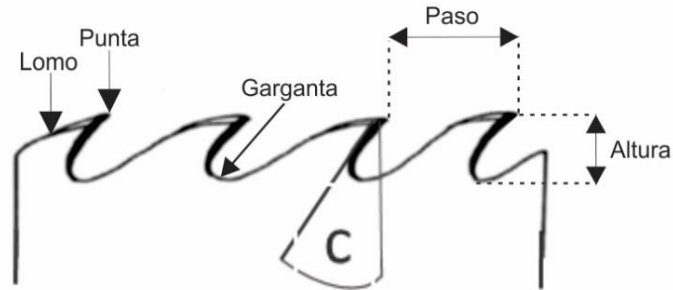


Figura 4.20. Detalle de las partes y parámetros del diente.
Fuente: adaptada de CITEMadera (2011); Cuenca García (2006).

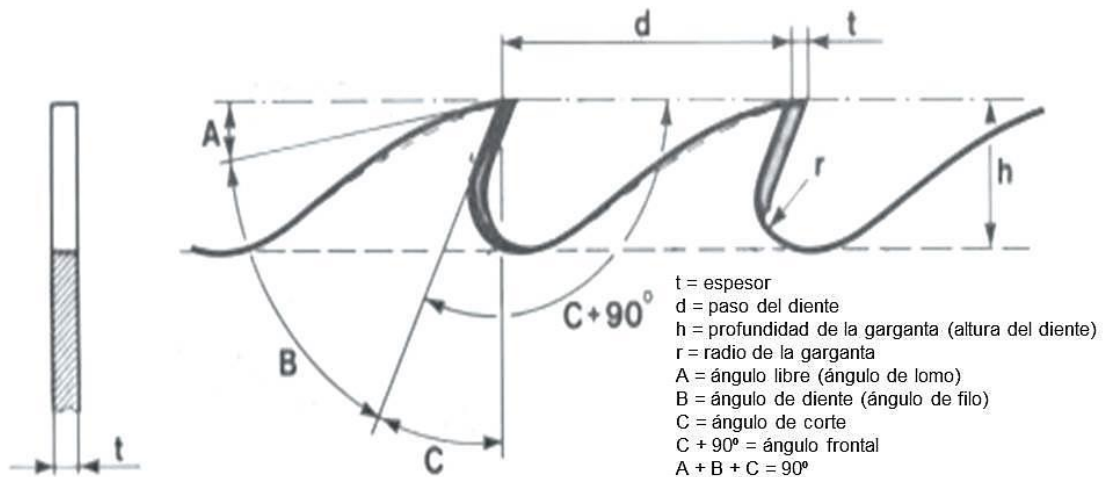


Figura 4.21. Partes, ángulos y parámetros del diente.
Fuente: Cuenca García (2006).

Tipos de dientes de sierras sinfín

Además del **trabado** y el **recalcado** descritos en este capítulo, se encuentran los dientes **estelitizados**.

El **estelitizado** es el soldado de la punta del diente con estelite, material más resistente que el del cuerpo del elemento de corte. Luego del estelitizado se realiza el afilado, igualado o rectificando. Con esto se logra que el rendimiento de la herramienta de corte sea mayor cuando se estelitan los dientes de la cinta (Figura 4.22). Este recubrimiento se utiliza para prevenir el desgaste causado por especies duras, particularmente, por aquellas que contienen un alto contenido de sílice (Devlieger & Baettig, 1999).

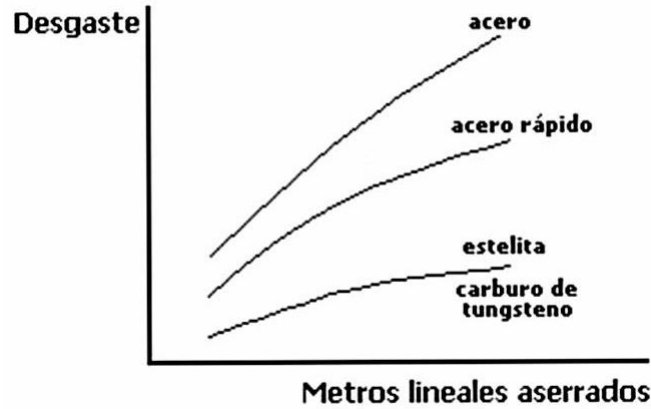


Figura 4.22. Desgaste del diente según materiales.
Fuente: Devlieger & Baettig (1999).

- Mantenimiento de hoja de sierra sinfín con dientes recalcados

Las actividades que se realizan en una sierra sinfín con este tipo de dientes, son las más utilizadas en la industria nacional e internacional, siendo además las factibles de realizar en el CTM. Entre ellas se incluyen en orden de realización: corte o guillotinado, soldadura, revenido o templado de la soldadura, terminación de soldadura, laminado, pre-afilado, recalco, igualado y afilado; estas tareas serán detalladas a continuación, tomando como base, fundamentalmente, lo considerado por Cuenca García (2006).

El **corte o guillotinado**, tal como su nombre lo indica, es el corte realizado con guillotina (Figura 4.23). Éste se realiza de manera perfectamente perpendicular al lomo de la sierra, haciendo dos cortes limpios, uno de cada lado para lograr una soldadura uniforme entre ambos. El mismo se realiza a la mitad del paso del diente.



Figura 4.23. Guillotina-CTM.
Fuente: propia (2019).

Una vez obtenida la hoja de sierra con los cortes antes mencionados, se realiza el proceso de **soldadura** (Figura 4.24); ésta consiste en la unión de las dos partes guillotadas de la hoja de sierra mediante una soldadura MIG (gas inerte Argón) o MAG (Argón + CO₂) (Sánchez Rojas, 2008).



Figura 4.24. Cordón de soldadura-CTM.
Fuente: propia (2019).

El **revenido o templado** es el tratamiento térmico que se realiza posterior a la soldadura, donde se produce un calentamiento lento a 500°C de la zona de soldadura; luego se envuelve con una tela para que se enfríe lentamente. Este proceso tiene por finalidad quitar rigidez a la unión que puede producir fisuras en la hoja de la sierra sinfín durante su trabajo (Figura 4.25).

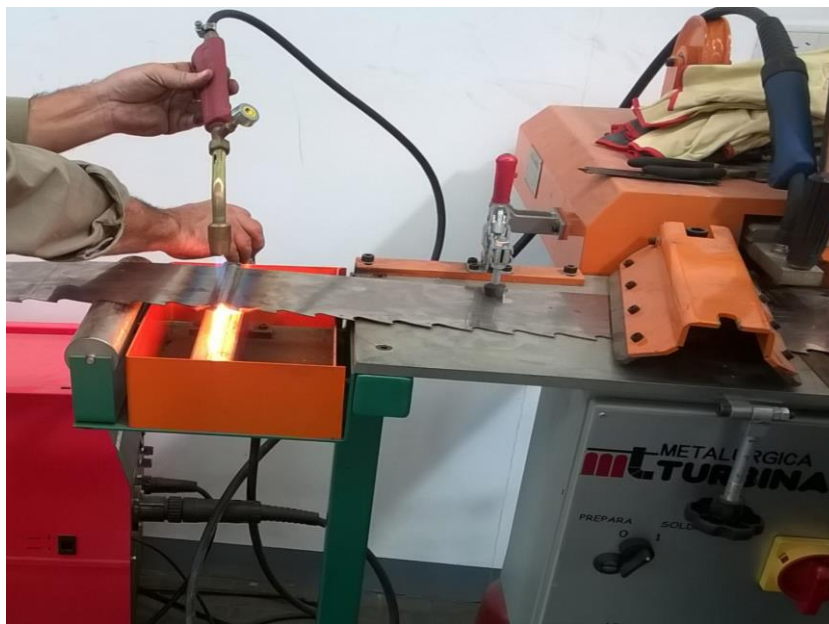
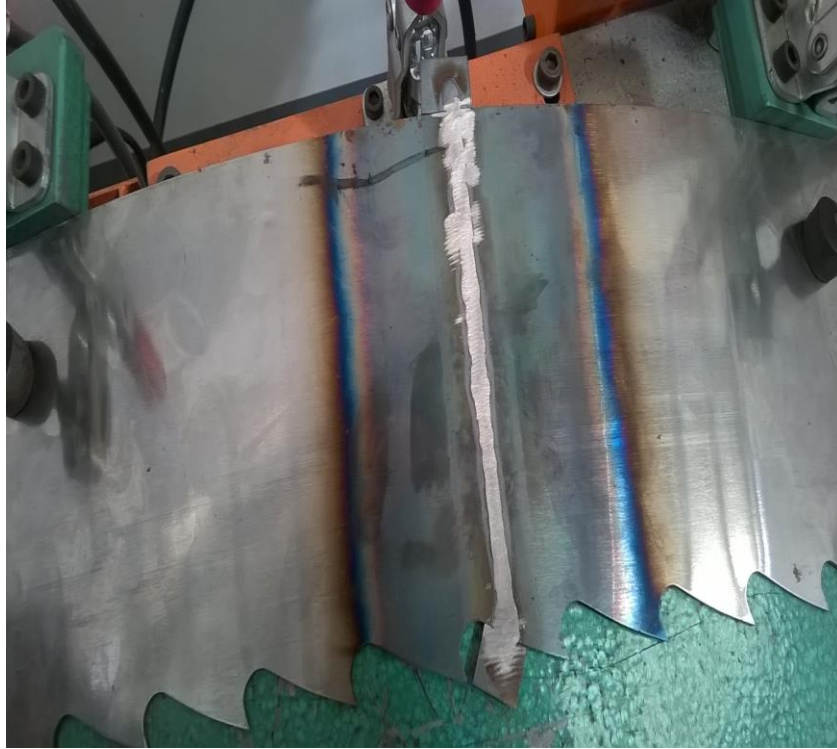


Figura 4.25. Proceso de revenido-CTM.
Fuente: propia (2019).

El proceso de soldado produce una marca de mayor espesor que el espesor de la hoja, por lo que en la **terminación de la soldadura** se realiza un tratamiento en el cual se pule la superficie soldada, eliminando el cordón formado con una amoladora, a fin de mantener el espesor de la sierra constante en toda su longitud y ancho (Figuras 4.26).



*Figura 4.26. Terminación de la soldadura-CTM.
Fuente: propia (2019).*

Con la hoja unida por los extremos, el próximo trabajo es el **laminado**, proceso que se realiza en ambos lados de la sierra para generar una tensión interna, que, junto a la tensión de montaje, hacen que la sierra se mantenga sobre los volantes.

Antes de comenzar con el laminado, la superficie de la sierra debe estar perfectamente limpia, lo cual se realiza aplicando gasoil con un pincel y limpiando con un paño; el óxido se quita con lija.

El laminado se logra dando mayor longitud en la zona central de la sierra, mediante dos rodillos que provocan el aplastamiento del material. La zona de laminado se ubica a 15 mm de la garganta del diente y a 15 mm del lomo de la sierra. Para realizar dicho proceso, se hacen pasar los rodillos con diferentes niveles de tensión sobre la hoja. Se pasa con mayor tensión en la pasada 1, luego en la 2 y 3, y con menor intensidad en la pasada 4 y 5; posteriormente se da vuelta la cinta y se hace igual con la pasada 6 y 7, aplicando mayor intensidad que en la pasada 8 y 9 (Figuras 4.27 y 4.28).

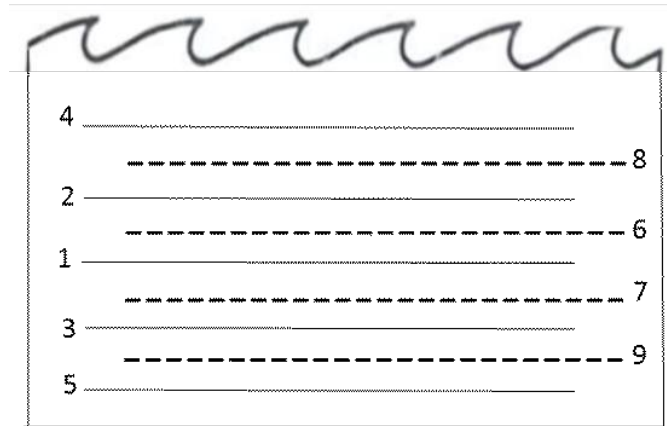


Figura 4.27. Esquema del proceso de laminado.
Fuente: adaptado de Cuenca García (2006).



Figura 4.28. Proceso de laminado-CTM.
Fuente: propia (2019).

Para verificar el correcto proceso de laminado se deben controlar la planitud, el tensionado y la rectitud de la hoja de la sierra. La planitud se controla visualmente entre guías, es decir en la parte plana de la sierra. El tensionado se controla con una regla; para ello, la sierra se ubica sobre el banco de trabajo, de modo tal que permita la correcta determinación; la regla se coloca presionando ligeramente contra la hoja, lo cual genera una línea delgada de luz, de pocas décimas de milímetros, que es la que indica el tensionado apropiado, el cual es juzgado visualmente. La rectitud es controlada con una regla colocada sobre el lomo de la sierra y en toda su longitud (Figura 4.29).



Figura 4.29. Control de rectitud de la hoja-CTM.
Fuente: propia (2019).

Tras los procesos realizados anteriormente, la hoja de sierra está lista para su **pre-afilado** (Figura 4.30). Este proceso se realiza en la máquina afiladora, y respetando el paso del diente, se le otorga el ángulo de ataque, la altura y la forma del diente deseada; la forma más común es la de pico de loro. El ángulo de ataque debe ser el mayor posible para reducir el esfuerzo de corte y por ende, la energía consumida. Además, el valor de dicho ángulo debe compatibilizarse con un adecuado grado de solidez del diente (Devlieger & Baettig, 1999).



Figura 4.30. Proceso de pre-afilado-CTM.
Fuente: propia (2019).

Con la forma del diente definida, se procede a su **recalcado**, proceso por el cual se presiona al material produciendo el ensanchamiento y endurecimiento (acritud) de la punta del diente, lo cual es, en general, realizado manualmente (Figura 4.31).



*Figura 4.31. Recalcadora-CTM.
Fuente propia (2019).*

El próximo paso es el **igualado** de la punta del diente (Figura 4.32). El mismo consiste en la rectificación de los dientes recalcados, a fin de asegurar su uniformidad y regularidad en las aristas cortantes (INFOR, 1989).



*Figura 4.32. Igualadora sierra sinfin en banco de trabajo-CTM.
Fuente: propia (2019).*

Luego del igualado de los dientes, la hoja pasa por el último proceso de mantenimiento que es el **afilado** (Figuras 4.33 y 4.34), el cual consiste en otorgarle filo al diente recalcado e igualado. Para afilar la sierra sinfín se emplea un disco de óxido de aluminio. El trabajo se realiza en un banco donde se regula el avance en base al paso del diente, y la profundidad del trabajo en base a la altura del diente y la forma de la garganta.

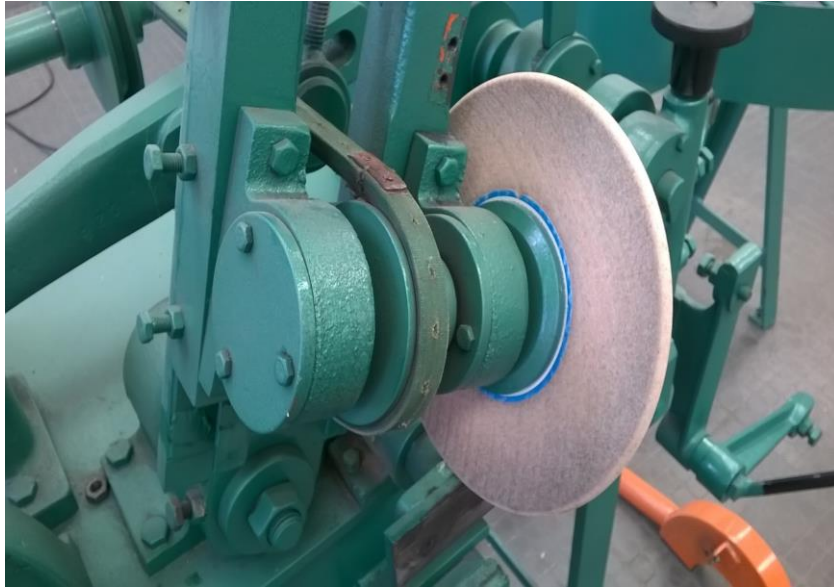


Figura 4.33. Piedra de afilado-CTM.
Fuente: propia (2019).

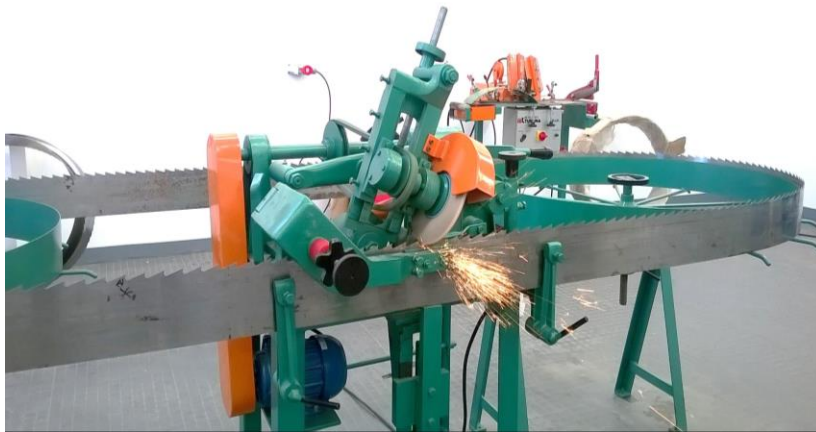


Figura 4.34. Afiladora en posición de trabajo-CTM.
Fuente: propia (2019).

- Mantenimiento de hoja de sierra sinfín con dientes trabados

La operación de **trabado** o **triscado** consiste en doblar alternativamente los dientes de la sierra sinfín, a la derecha e izquierda con una inclinación uniforme, de manera de asegurar regularidad durante el corte. Esta técnica es recomendada para sierras de cinta estrecha de hasta 50-60 mm de ancho.

El trabado se realiza teniendo en cuenta la densidad de las maderas. Para maderas duras, los dientes deben girar a un tercio de su altura, y para maderas blandas, a la mitad de su altura.

El doblado se inicia desde la parte superior del diente, ya que si se inicia desde su base, el doblado resulta menos eficiente durante el corte, pudiendo producirse su quiebre y rotura.

El trabado no deberá ser excesivo porque ello hará que la sierra trabaje con un exceso de esfuerzo, dando un acabado de mala calidad y produciendo sobrecalentamientos perjudiciales para la cinta. Es conveniente dejar un diente que cumpla la función de “limpiador”, el cual no atraviesa la operación de trabado. De este modo, se dobla un diente hacia un lado, el siguiente hacia el lado opuesto y el tercer diente (“limpiador”) permanece sin doblar, y así sucesivamente.

En términos generales, ambos procesos, recalcado y trabado, tienen como objetivo principal ensanchar el diente con respecto al cuerpo de la sierra para que no se produzca la fricción de la madera contra el metal de la hoja en su avance.

Mantenimiento de sierra circular

Para una mejor comprensión del mantenimiento de la sierra circular, se tendrán en cuenta las partes constitutivas desarrolladas en el Capítulo 2. La misma consta de un disco dentado en su periferia, montado sobre un eje, fijado a él con una tuerca y, entre la tuerca y el disco, tiene un collarín, cuya función es evitar el desplazamiento del disco sobre el eje y permitir que permanezca en un mismo plano de corte. El elemento de corte de la sierra circular (diente) ya viene afilado de fábrica. La máquina se completa con un disco separador ubicado al final del lugar de corte para evitar que la madera cortada se cierre sobre la hoja, produciendo la quemadura de la madera y recalentando el disco. Sobre el disco se encuentra además, una protección en forma de medialuna.

Los dientes de las sierras son de widia, químicamente compuesta por carburo de tungsteno, material frágil pero resistente al desgaste. Generalmente, trabajan con un máximo de 60 m/seg de velocidad de alimentación, que representa una velocidad de 1.500-2.000 rpm; comparativamente las sierras sinfín trabajan a 500 rpm (Devlieger & Baettig, 1999).

Las sierras circulares usadas como desdobladoras o canteadoras (cortes longitudinales), tienen dientes denominados “rascadores” o “rasuradores”, que son placas de metal duro ubicadas entre el espesor intermedio del cuerpo y el espesor de diente. Estas placas permiten que la madera no apriete la sierra, cumpliendo la función de guía posterior al corte, como así también de ventilación para bajar la temperatura de trabajo del disco.

Las sierras circulares empleadas como despuntadoras (corte transversal), no tienen dientes “rascadores” o “rasuradores”, sino que presentan ranuras de dilatación para absorber la expansión del material; las mismas terminan en forma curvada para evitar la concentración de tensiones y el agrietamiento del disco.

El mantenimiento de las sierras circulares es más sencillo que el de las sierras sinfín y consta de afilado, aplanado y recambio de dientes.

Para el **afilado** hay que regular el ángulo del diente (Figura 4.35). En corte longitudinal se usa un ángulo de ataque del diente de 15-20°. La widia se afila con disco de polvo de diamante; solo se afila la parte del frente, paralelo al lomo de la widia. Un disco se afila entre 30 y 40 veces (Cuenca García, 2006).

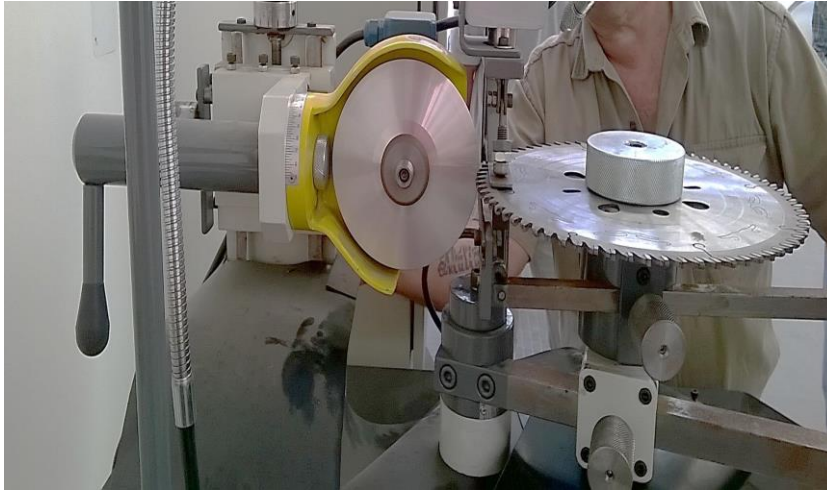


Figura 4.35. Afilado de sierra circular-CTM.
Fuente: propia (2019).

El **aplanado** es un trabajo generalmente realizado de manera manual en los aserraderos locales, con martillo y yunque circular. El espesor del cuerpo de la sierra es de 3 mm y el del diente es 2 mm superior, es decir que el espesor del diente tiene un ancho total de 5 mm, el cual se va desgastando con afilados sucesivos (Cuenca García, 2006).

El **recambio de dientes** se realiza en el momento que se observa alguna deficiencia durante el corte de la madera; la sustitución es a través de encastrés entre los elementos que están preparados para recibir los dientes, no teniendo complicaciones técnicas para su montaje (Cuenca García, 2006).

Cabe mencionar que si bien en este capítulo se han descrito las actividades básicas generales, e incluso las llevadas a cabo en el CTM, según sea el tipo de aserradero, su envergadura y equipamiento disponible, las actividades de mantenimiento pueden verse diversificadas.

Consideraciones finales

De acuerdo a lo desarrollado en este capítulo, se resalta la importancia de considerar los factores que afectan el funcionamiento de los aserraderos, influyendo directamente sobre el rendimiento, la producción y la calidad de la madera aserrada. Para poder lograr una mejora en estos parámetros, la industria debe definir y poner énfasis en la selección y formación permanente del personal, la optimización de sus decisiones en los diferentes procesos que involucra el aserrado, como así también, el correcto mantenimiento de los equipos y maquinarias que intervienen en todo el proceso, a fin de lograr una calidad constante de los productos del aserrado.

Referencias

- Acevedo Correa, C.G. (2014). *Optimización de Corte Longitudinal para Trozas Podadas de Pino Insigne con Reconstrucción Tridimensional* (Tesis de grado). Recuperada de Universidad del Bío-Bío, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería en Maderas. Concepción, Chile.
- Aguilar Cayún, C.F.; Sanhueza Bravo, R.A. (2003). *Caracterización y Estandarización de Productos, Procesos y Equipos en la Industria del Aserrío* (Tesis de grado). Universidad del Bío Bío. Concepción, Chile.
- Arreaga Morales, J.G. (2007). *Rendimiento en la transformación de madera en rollo a madera aserrada de la especie de Caoba (Swietenia macrophylla), en dos aserraderos del Municipio de Flores, Peten* (Tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía, Instituto de Investigaciones Agronómicas y Ambientales. Guatemala.
- Baca Marín, H. (2001). *Coeficiente de aserrío y caracterización del aserradero ejidal Santa María Magdalena Cahuacán, Nicolás Romero, Estado de México* (Tesis de grado). Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” División de Agronomía. México.
- Bach. Huarcaya de la Cruz, D.M. (2011). *Rendimiento en Aserrío de Myroxylon balsamum Harms y Dipteryx micrantha Harms. Iñapari-Madre de Dios* (Tesis de grado). Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ciencias Forestales y del Ambiente. Huancayo, Perú.
- Catrinahuel Montenegro, L.I.; Beltrán Tiznado, V.A. (2006). *Herramientas informáticas para la planificación de la producción en aserraderos* (Tesis de grado). Universidad del Bío Bío. Concepción, Chile.
- CITEmadera. (2011). Guía de contenidos Buenas prácticas en la operación y mantenimiento del aserradero. Serie I Competencias básicas para la producción industrial de muebles de madera. Lima, Perú: Centro de Innovación Tecnológica de la Madera.
- Cuenca García, R. (2006). *Manual técnico de capacitación en calibración de los equipos de aserrío y de afilado y mantenimiento de sierras de cinta y disco*. Programa de Desarrollo de Políticas de Comercio Exterior. Memorando N°861. VMCE. BID. 1442/OC-PE/CDE.
- Devlieger, F.; Baettig, R. (1999). *Ingeniería de Aserraderos. Fundamentos de Planificación y Gestión*. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca. Chile.
- González Soto, A. (2017). *Control de calidad de madera en pie y madera aserrada para el mercado de construcción del Grupo Empresarial El Almendro* (Tesis de grado). Universidad Nacional Costa Rica, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar. Heredia, Costa Rica.
- INFOR. (1989). Principios de organización y operación del aserradero. Manual N°16. Concepción, Chile: Corporación de fomento a la producción.
- Sánchez Rojas, L. (2008). *Mantenimiento de sierras cintas y sierras circulares*. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- Spavento, E. (2015). *Caracterización y mejora tecnológica de la madera de Populus x euramericana I-214 (Dode) Guinier, austral y boreal, con fines estructurales* (Tesis doctoral). Recuperada de Universidad de Valladolid. España.

CAPÍTULO 5

Valor agregado en madera aserrada: secado y remanufactura

Eleana M. Spavento y M. Mercedes Refort

Consideraciones generales

La madera aserrada es destinada a aplicaciones estructurales y no estructurales con requerimientos propios que deben ser tenidos en cuenta para permitir su apropiado uso. Un factor determinante en este sentido, es la adecuación de su contenido de humedad a las condiciones de servicio, el cual es obtenido a través de diferentes procesos de secado. Del mismo modo, dado que es un material biológico con presencia de singularidades (anomalías) que afectan su resistencia, debe realizarse un proceso de clasificación a fin de definir su influencia y consecuente aptitud de uso. Por su parte, la transformación secundaria del material aserrado (remanufactura), implica una serie de actividades tendientes a la producción de elementos de madera reconstituida de mayor valor agregado.

En el presente capítulo se retomarán los aspectos más importantes de la madera aserrada y se abordarán los temas referentes a los procesos de secado, clasificación y remanufactura de mayor difusión en nuestro país.

Madera aserrada: definición

Tal como se mencionó en los Capítulos 2 y 3, se define como madera aserrada a todo material con espesor, ancho y largo definido, obtenido a partir de un sistema de aserrado aplicado a un rollizo de madera. Si bien las partes y términos geométricos que la definen fueron desarrollados en el Capítulo 3, a continuación se representan gráficamente y detallan otras referencias, indicadas en la IRAM 9670 (2002), utilizadas fundamentalmente durante el proceso de clasificación (Figura 5.1).

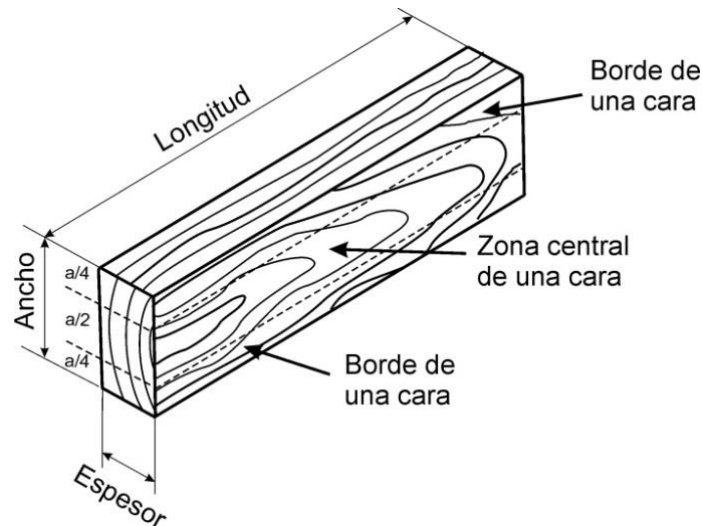


Figura 5.1. Partes de madera aserrada.
Fuente: Spavento & Keil (2008).

Borde de una cara: zona de la superficie de una cara que abarca todo el largo de la pieza; está comprendida entre una arista y una línea que pasa por la cuarta parte del ancho de la cara (25% de la cara); la cara tiene dos bordes.

Zona central de una cara: zona de la superficie de la cara que abarca todo el largo; está comprendida entre las líneas de las zonas borde de la cara (50% de la de la cara).

Asimismo, cabe aclarar que se denomina **madera aserrada estructural** al elemento lineal de sección rectangular, que ha sido clasificado estructuralmente por alguno de los procedimientos reconocidos en las normativas que se detallarán más adelante en este capítulo (clasificación visual o mecánica). Algunos ejemplos de este tipo de madera se encuentra en las estructuras (de luces variadas) empleadas en muros, viguetas, cubiertas de madera, entre otros. Por su parte, la **madera aserrada no estructural** es aquel elemento lineal, de sección rectangular o cuadrada, que no ha sido clasificado dentro de los grados estructurales. Las aplicaciones más frecuentes pueden ser: revestimientos al exterior, pisos de interior y exterior (*deck*), muebles de jardín, aberturas, entre otros (Galván, 2018).

Proceso de secado

El proceso de secado consiste en eliminar el exceso de agua de la madera bajo condiciones rápidas, económicas y sin ocasionar defectos, u ocasionando la menor cantidad posible, convirtiéndola de este modo, en un material apropiado para distintas aplicaciones industriales.

Un concepto básico en este proceso es el contenido de humedad (CH), el cual queda definido como la relación entre el peso de agua de una pieza y su peso anhidro (Fórmula 5.1), constituyendo un factor determinante para el uso apropiado de la madera.

$$CH (\%) = \frac{Ph - Po}{Po} \times 100 \quad (5.1)$$

Siendo: CH: contenido de humedad, en %; Ph: peso de la probeta seca al aire, en g; Po: peso anhidro obtenido mediante secado en estufa a 103±2°C, hasta peso constante, en g.

En términos generales, la importancia del secado consiste en una serie de ventajas que se enumeran a continuación (Fernández Golfín Seco & Conde García, 2007; JUNAC, 1989):

- Permite la estabilización dimensional de la madera frente a variaciones en su CH.
- Aumenta su resistencia mecánica y biológica (agentes de deterioro).
- Mejora las propiedades de aislación térmica, eléctrica y acústica.
- Reduce su peso, favoreciendo su manipulación y traslado
- Mejora la trabajabilidad, adhesividad, aplicabilidad y anclaje de productos protectores de la madera (tratamientos superficiales e impregnación profunda en autoclave).

En este sentido, el uso de un elemento de madera con un CH acorde a las condiciones de servicio, garantiza, en gran parte, sus prestaciones durante un prolongado tiempo. Al ser un material poroso, la madera absorbe o pierde humedad del ambiente, siempre que no exista igualdad entre las presiones parciales de vapor del aire circundante y del cuerpo húmedo. Mientras estos valores de presión sean diferentes, habrá transferencia de humedad del material al ambiente y viceversa. Cuando esas presiones de vapor se igualan, se alcanza el estado de humedad de equilibrio del material. Dicho estado depende de factores como la densidad, el espesor, el contenido de extractivos, entre otros (JUNAC, 1989). Por lo que, para cada situación de uso, la madera deberá alcanzar un contenido de humedad de equilibrio higroscópico (HEH) determinado, el cual queda definido por las condiciones de humedad relativa y temperatura del ambiente a las cuales se encontrará expuesta.

Para estimar el CH de una manera rápida, existen equipos de determinación indirecta denominados xilohigrómetros, los cuales no imposibilitan el uso posterior de la madera. Estos pueden ser de determinación no destructiva, cuando su uso no implica la rotura o el marcado del material, o pseudo-no destructiva, cuando implica el marcado de la superficie. El primero de ellos, es indicado en la Figura 5.2, cuyo funcionamiento es a través de radio frecuencia (determinación por diferencial de potencia); para la determinación del CH, este higrómetro es apoyado en la madera; el segundo de ellos, es ejemplificado en la Figura 5.3 y su funcionamiento es a través de resistencia eléctrica (determinación a través de dos electrodos); para la determinación del CH, los electrodos son insertados en el material. Dicha resistencia es función de la resistividad de la madera, la cual a su vez depende de su CH.

En este sentido, existe una relación aproximadamente lineal entre el logaritmo de la resistencia eléctrica y el contenido de humedad de la madera, en el rango entre 6% y 25% de CH. Por debajo del 6%, la resistencia se eleva de un modo tal, que no es posible su determinación con este tipo de aparatos, y por encima del 25% de CH, la relación disminuye debido a la dispersión natural de los valores medios, y por lo tanto, las lecturas obtenidas, no son precisas. La

temperatura de la madera afecta los valores de la resistencia eléctrica, por lo que la lectura efectuada con aparatos eléctricos debe ser corregida de acuerdo a ella.



Figura 5.2. Xilohigrómetro de contacto-LIMAD.
Fuente: propia (2020).

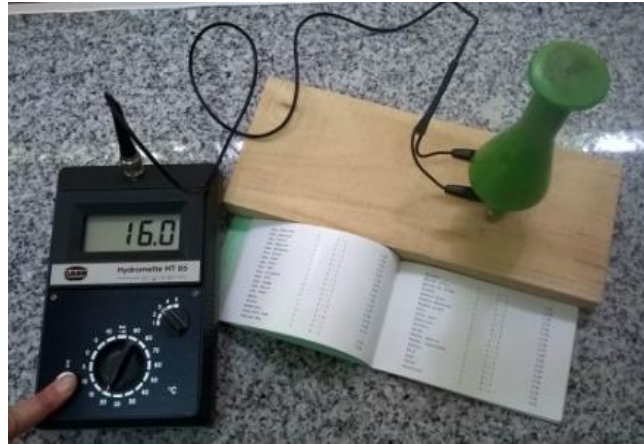


Figura 5.3. Xilohigrómetro de resistencia-LIMAD.
Fuente: propia (2020).

Elementos de control y organización del proceso de secado

El secado de la madera puede llevarse a cabo de manera natural o bien, mediante secado técnico en cámara. En ambos casos, el agua es removida de la superficie de la madera por evaporación, cuya velocidad es controlada por la temperatura, humedad del ambiente y velocidad del aire (JUNAC, 1989).

Temperatura (T°)

Es la fuente de calor que la madera requiere para que las moléculas de agua adquieran la energía cinética para su evaporación. En el secado natural, la T° es propiciada por la radiación directa del sol; no es regulable ni controlable. En el secado técnico, la T° es aportada por radiación directa suministrada por una fuente externa (caldera para generarla y radiadores para distribuirla), y es controlada con el termómetro de bulbo seco del psicrómetro del secadero.

Humedad relativa del aire (HR)

Es la relación entre la presión parcial del vapor de agua presente en el aire y la presión de vapor saturado a la misma temperatura, expresada en porcentaje (%).

En el secado natural, la HR se determina a través de un higrómetro; en el caso del higrómetro de cabello, el equipo se basa en la propiedad del cabello de elongarse y contraerse cuando el aire está húmedo y seco, respectivamente. Dicho movimiento es transmitido, mediante un sistema de palancas, a una aguja que indica la HR circundante en un dial. En el secado técnico, la HR se determina en forma indirecta a través de tablas psicrométricas, que consideran datos de temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo, a lo cual se le denomina diferencia psicrométrica (Δ psicrométrica). El bulbo seco indica la temperatura real del aire y su valor es superior a la del

bulbo húmedo (excepto al 100% de HR), ya que en este caso, está cubierto por una tela húmeda que al evaporar parte de dicha humedad, sufrirá un enfriamiento. El equipo que contiene ambos termómetros se denomina psicrómetro.

Velocidad del aire (VA)

Es la variable necesaria para transmitir y distribuir la energía requerida para calentar el agua contenida en la madera, facilitando su evaporación y transportando la humedad saliente de la madera. A mayor VA, mayor tasa de evaporación y menor tiempo de secado, y viceversa. Por ello, para asegurar un secado rápido y uniforme es indispensable una circulación fuerte y regular del aire, sin perder de vista la calidad de la madera.

En el secado natural la velocidad del aire (viento) no puede controlarse. En el secado técnico la velocidad del aire es regulada y controlada a través de ventiladores, y es medida con anemómetros.

Por lo expuesto, el proceso de secado podría definirse como el resultado del movimiento de la humedad de la madera desde el interior hasta la superficie, donde se evapora y escapa a la atmósfera circundante (JUNAC, 1989). En este sentido, se tiene en cuenta el concepto de capa límite, que es la capa de aire cercana a la madera, más saturada de humedad; a dicha capa le circunda el aire más externo que también la rodea. Cuanto menor sea el espesor de la capa límite, más efectivo será el secado, ya que debe ser removida permanentemente para bajarle su tenor de humedad, permitiendo que el agua de la madera pase al aire. La VA aumenta la tasa de evaporación, pero se debe evitar generar un ambiente muy seco que acelere demasiado el proceso de secado y en consecuencia, genere defectos en la madera (Figura 5.4).

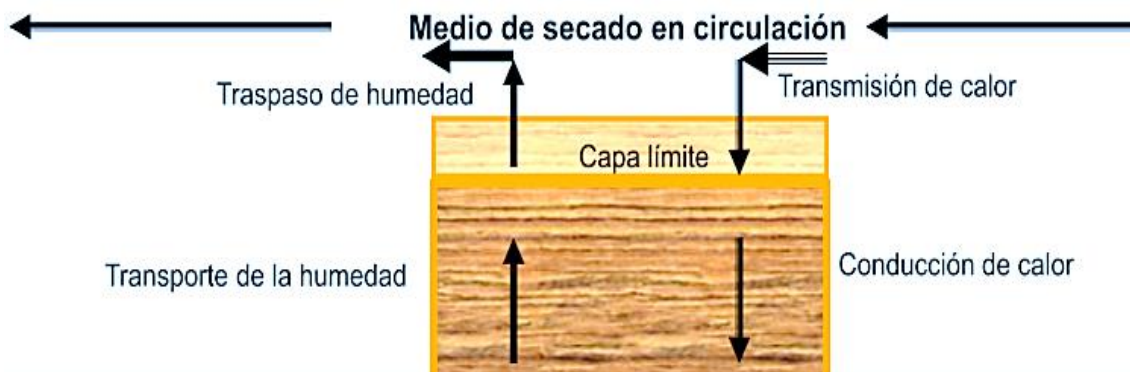


Figura 5.4. Esquema capa límite.
Fuente: Atencia (s.f.).

Estibado de la madera

Una consideración general para el secado natural y para el secado técnico, es la similitud en la preparación-organización del material objeto de secado, es decir en el armado de las estibas de madera. En primer término, no deberían mezclarse especies ni espesores; en el caso que eso suceda, la situación más desfavorable será la que “regule” el proceso de secado, esto es, mayores espesores y especies con dificultad de secado, se colocan en los sectores más expuestos de las pilas (parte superior y exterior).

En cuanto al armado de la estiba *per se*, hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones (Figura 5.5): la primera fila de tablas a estibar debe estar colocada sobre bases o travesaños, separadas del suelo a una altura de 0,5 m, permitiendo la circulación del aire húmedo por debajo. Cada capa debe estar separada a través de listones denominados separadores, siguiendo las especificaciones de distanciamiento presentadas en Tabla 5.1. Cada tabla a secar debería estar una cercana a la otra dejando un espaciamento entre ellas (o sea, sin contacto), aunque en la práctica es complicado llevarlo a cabo, razón por la cual, se suelen poner en contacto canto con canto.

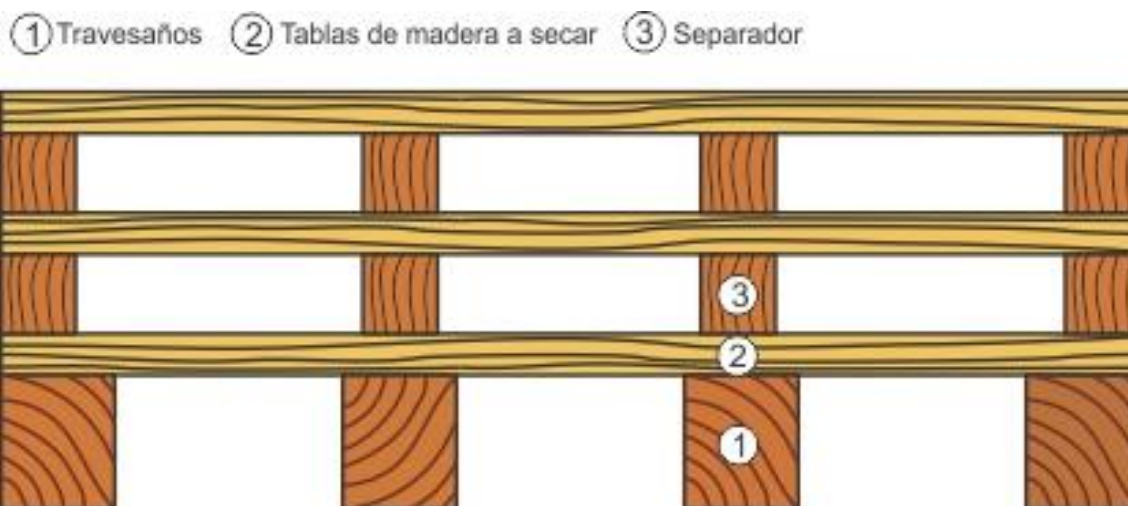


Figura 5.5. Representación general de la estiba.
Fuente: adaptada de Atencia (s.f.).

Espesor de la madera a secar (mm)	Distanciamiento de los separadores (m)
Hasta 30	0,30 – 0,40
30 - 50	0,40 – 0,70
Más de 50	0,70 – 1,00

Tabla 5.1. Distribución de los separadores según el espesor de la madera a secar.
Fuente: Atencia (s.f.).

Las bases pueden ser de cemento o de madera, de sección rectangular y de longitud igual al ancho de la pila. Los separadores deben ser, preferentemente, de la misma especie a secar o de características tecnológicas similares para evitar comportamientos diferenciales durante el proceso de secado; de espesores uniformes, en general entre 20 y 50 mm, dependiendo del espesor de la madera a secar; deben estar correctamente escuadrados; y deben encontrarse con contenidos de humedad de equilibrio higroscópico a fin de evitar cambios dimensionales que repercutan en la estabilidad de la pila durante el período de secado. Los separadores externos deben estar alineados con las cabezas de las tablas, formando un plano, a fin de controlar la aparición o evolución de grietas y/o rajaduras de cabeza; las cabezas de las tablas deben estar alineadas capa por capa. En caso de existir diferencias de longitud entre las tablas, la estiba debe realizarse alineándolas en uno de los dos extremos de la misma, alternando el

alineado entre los dos extremos para asegurar un soporte suficiente y una buena distribución del peso. Por su parte, si se estiba más de una pila encima de otra, cada una debe ir separada con bases similares a las colocadas al iniciar el armado de la estiba. A fin de evitar deformaciones en las tablas superiores, se le deben agregar contrapesos en la parte superior de la pila (Atencia, s.f.; JUNAC, 1989).

En el **secado natural**, si la estiba se coloca sobre un suelo natural, además de colocarse elevada del piso tal como se mencionó anteriormente, debe contar con terreno consolidado, libre de obstáculos y malezas, para una adecuada ventilación, con buen drenaje y/o con pendiente que evite el encharcamiento y permita el traslado y las operaciones de apilado. La estiba debe ubicarse con orientación Norte-Sur o en sentido perpendicular al viento predominante de la zona, a fin de evitar la aparición de grietas y rajaduras de cabeza.

El patio de secado debe diseñarse de manera tal, que contemple calles de distintas jerarquías y caminos cortafuegos que permitan evitar la propagación de incendios y mejorar la circulación del aire. De esta manera, deben preverse calles principales que faciliten el transporte y el apilado; calles transversales, perpendiculares a las anteriores que eventualmente sirvan como barreras cortafuegos; calles laterales entre pila y pila en sentido lateral, que actúen como barreras de protección a determinados defectos; y calles posteriores, ubicadas en los extremos de las pilas. En términos generales, la orientación de las calles principales está en relación a la dirección de los vientos predominantes, o de acuerdo a los puntos cardinales según se quiera evitar o aprovechar la radiación solar; la separación entre estibas debe ser de aproximadamente 50 cm, a fin de permitir la correcta circulación del aire (Figura 5.6) (Atencia, s.f.; JUNAC, 1989).

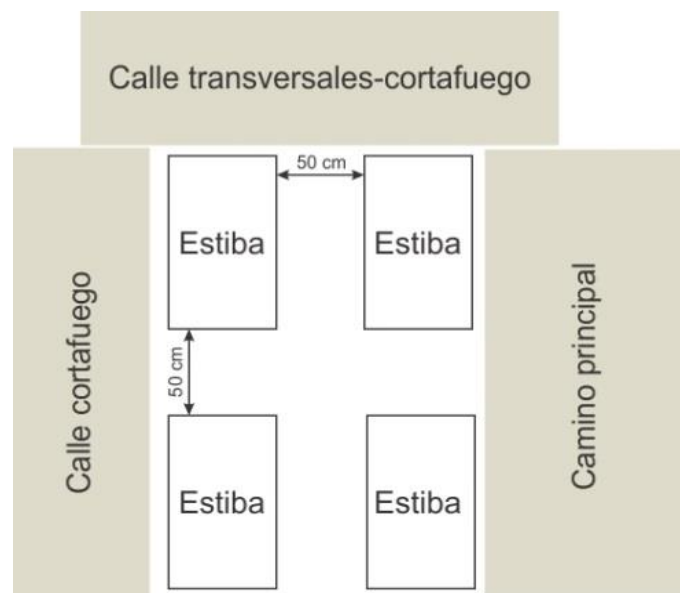


Figura 5.6. Esquema del patio de secado natural.
Fuente: adaptada de Atencia (s.f.).

En el **secado técnico**, la estiba debe colocarse en sentido perpendicular a la circulación del aire de los ventiladores. Los controladores de humedad de la madera (sondas-electrodos) deben estar colocados de manera de cubrir las zonas más desfavorables de la estiba y de la

cámara, y deben ser colocados de a pares en sentido perpendicular a la fibra de la madera, con un distanciamiento entre 25-30 mm y, preferentemente, en el centro de la tabla, a 0,5 m de las cabezas de las mismas.

Parámetros del proceso de secado

Gradiente de humedad (GH)

Al colocar la madera húmeda en contacto con un ambiente seco, las diferencias entre las presiones parciales de vapor de la atmósfera y del agua contenida en la madera dan lugar, en principio, a la evaporación del agua de las capas superficiales, permaneciendo húmedas las capas internas. La diferencia de CH que se establece entre el centro y la superficie de una pieza se denomina **gradiente de humedad**, y origina la circulación interna del agua desde el centro a la periferia permitiendo la evolución del secado.

Cuando se iguala el contenido de humedad del centro de la madera con el de la superficie y el del ambiente, el proceso de secado se detiene o ha culminado. En la práctica, se acepta un GH de hasta 2% que implica una diferencia de 2% entre el CH interno de la madera, más húmedo, y el superficial, más seco.

En el secado natural este parámetro no es controlable. En el secado técnico, este parámetro es controlado a través de muestras de control denominadas “probetas estratificadas”, que serán desarrolladas en este capítulo en las etapas del secado técnico.

Gradiente de secado (GS)

Para el correcto seguimiento del proceso de secado se debe tener en cuenta el contenido de humedad real de la madera en un momento determinado, y la HEH hacia la cual tiende, de acuerdo a las condiciones de T° y HR fijadas dentro del secadero o establecidas de manera natural. La relación o cociente entre estos dos valores se denomina **gradiente de secado**. De su magnitud depende la forma y el progreso de secado, y se establece entre un valor de 2 y 3 (adimensional), dependiendo de la especie y de la etapa del proceso (JUNAC, 1989).

En el secado natural, este parámetro no es controlable. En el secado técnico, este parámetro es controlable y previsto en el programa de secado, verificando el CH de la madera con sensores de humedad, y la HEH del ambiente a través de una placa de celulosa o de una madera sensible a los cambios de humedad del ambiente.

Secado natural

El secado natural o al aire libre consiste en exponer la madera a la acción de los factores climáticos del lugar, tales como temperatura, humedad relativa de la atmósfera y viento, estableciendo un equilibrio dinámico de humedad entre el medio ambiente y la madera. Este

proceso puede ser realizado a la intemperie, bajo dosel o bajo cubierta de tinglado (Figuras 5.7; 5.8 y 5.9, respectivamente).

Durante este proceso, sólo puede alcanzarse como resultado final, aquel contenido de humedad de la madera en equilibrio con las condiciones climáticas del sitio. Por lo tanto, el tiempo requerido para alcanzar la HEH es prolongado (varios meses) y en algunas ocasiones, dependiendo del tipo de uso, no es posible lograrse sino es a través del secado técnico. Dada la imposibilidad de controlar el gradiente de humedad, este proceso dependerá exclusivamente de las condiciones del medio ambiente.



*Figura 5.7. Secado natural a la intemperie (Abra Ancha, Neuquén).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2006).*



*Figura 5.8. Secado natural bajo dosel (Quechuquina, Neuquén).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2018).*



*Figura 5.9. Secado natural bajo tinglado-INTA (Trevelin, Chubut).
Fuente: propia (pasantía estudiantil, 2015).*

Secado técnico en cámara

El secado técnico en cámara es el procedimiento industrial aplicado para acelerar el proceso de secado de la madera, permitiendo llegar a contenidos de humedad imposibles de alcanzar con un secado natural (JUNAC, 1989). La cámara consiste en un recinto herméticamente cerrado, también denominado horno, que presenta condiciones climáticas diferentes a las condiciones atmosféricas normales (Figura 5.10). Si bien existen varios tipos de secados técnicos, el más utilizado es el convencional de aire caliente climatizado, modalidad aplicada en el CTM.



*Figura 5.10. Cámara de secado-CTM.
Fuente: propia (2020).*

En términos generales, las **cámaras** de secado están dotadas de **sistemas de calefacción** (calderas como fuente de energía y radiadores como disipadores de la misma), **sistemas de ventilación** (moto-ventiladores de funcionamiento reversible), **sistemas de humidificación** (tuberías de conducción de vapor con válvula de control), **sistemas de medición** (controladores de temperatura, sensores de HEH y sensores de humedad de la madera, generalmente ubicados en una oficina de control), **chimeneas, tablero eléctrico e instrumental de control** (computadora, procesador, módulo de control-medición y controlador programable de interfase de entradas y salidas) (Gottert, 2017; JUNAC, 1989). Cabe destacar que la cámara de secado del CTM (Figura 5.10) presenta, además de los sistemas indicados, un sistema de vaporizado mixto que permite atomizar agua fría en la línea de vapor, disminuyendo su temperatura y eliminando la posibilidad de sobrecalentamiento y aparición de defectos, especialmente en la etapa de acondicionamiento (Gottert, 2017). Un esquema general de una cámara de secado se indica en el Figura 5.11.

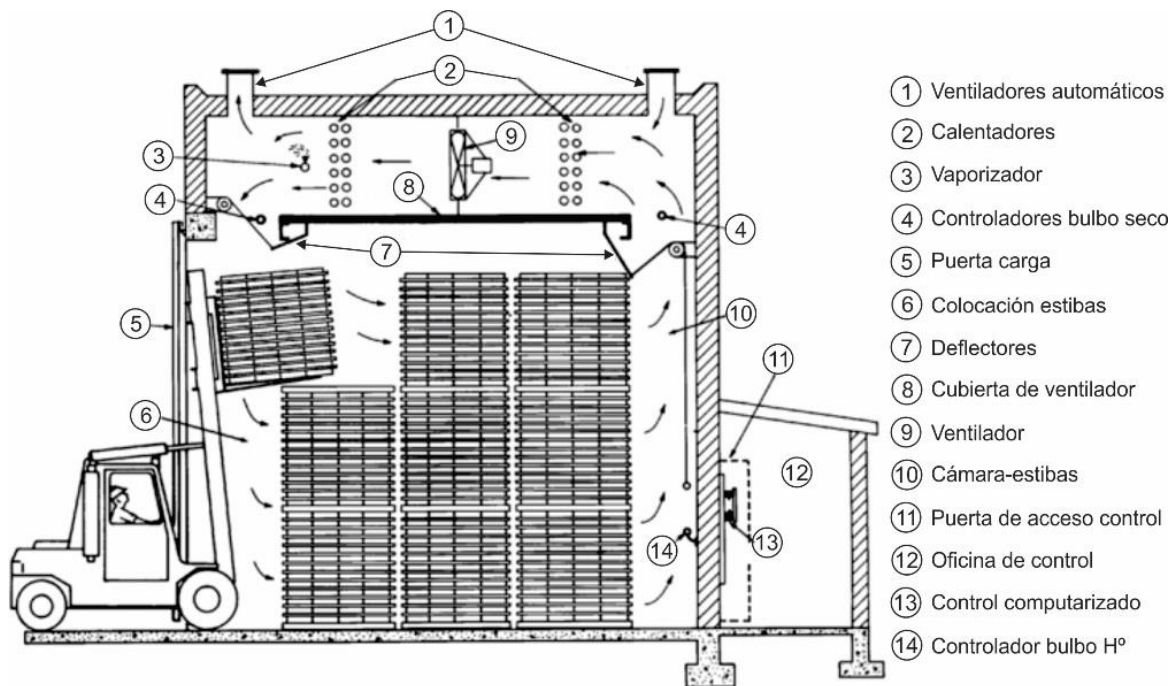


Figura 5.11. Esquema general interior de una cámara de secado y carga.
Fuente: Bergman (2010) con modificaciones.

A través de los sistemas antes mencionados se produce un flujo de aire estable que circula por las pilas de madera con T° y HR controladas; dichas condiciones son seleccionadas a través de **programas de secado (PS)** preestablecidos según especie y dimensiones (principalmente espesor) de la madera a secar. El objetivo del programa de secado es establecer condiciones y metas de HEH que conlleven a un secado progresivo con gradientes de humedad y de secado moderados, ajustados a las características del material. De este modo, se establece la condición final deseada sin tensiones y/o daños ocasionados por la pérdida brusca de agua, permitiendo un mínimo porcentaje de pérdida de madera (JUNAC, 1989); la

evolución de un PS es recogida en un controlador mediante el empleo de un software específico (Figura 5.12).

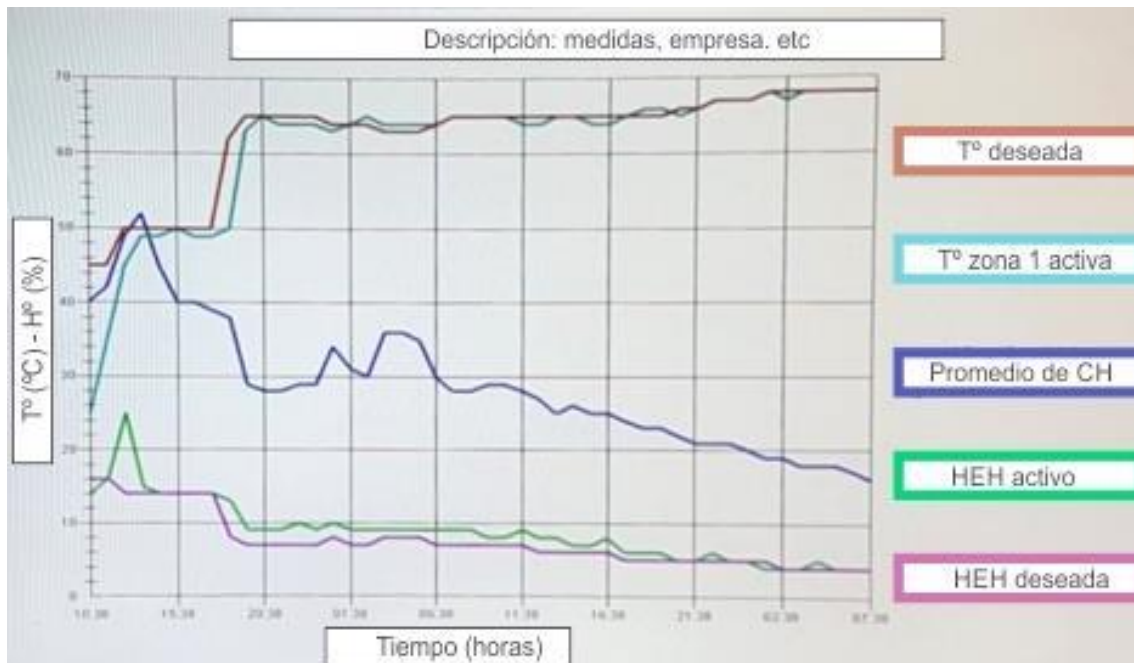


Figura 5.12. Programa de secado.
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2018).

De todas maneras, dependiendo de la especie maderera y del producto final deseado, en ocasiones se realiza un proceso de pre-secado y una etapa posterior de secado en horno. Mediante el pre-secado, se reduce el CH desde el estado verde hasta el 20-30%, permitiendo la liberación del agua libre de la madera. Esta etapa puede realizarse a la intemperie, tal como fue indicado anteriormente. También se puede realizar en pre-secaderos climatizados a bajas temperaturas y con ventilación, siendo la calidad del proceso superior a medida que aumenta el resguardo del material y las condiciones del proceso (JUNAC, 1989).

Proceso de secado técnico en cámara

El proceso de secado técnico puede dividirse en 9 etapas de las cuales 8 son obligatorias y una puede ser eventual. Cada etapa y condiciones se resumen en la Tabla 5.2.

Etapa	HR	T°	Δ psicrométrica	CH madera al inicio de la etapa
1	Saturación al 100%	En aumento desde la T° ambiente	Baja, tendiendo a 0°C (aumenta T°bs* y T°bh*)	CH de ingreso a la cámara (encima PSF*)
2	Saturación al 100%	Inicial PS*	Baja, tendiendo a 0°C (aumenta T°bs y T°bh)	CH de ingreso a la cámara (encima PSF)
3	En descenso (según PS)	Por encima de la inicial y constante (según PS)	En aumento (reducción T°bh)	Estado verde (encima PSF)
4	Constante (según PS)	En aumento (según PS)	Media (aumento constante T°bs y T°bh)	En el PSF
5	Baja (según PS)	T° máxima del PS y constante	Alta (aumento T°bs y reducción T°bh)	Debajo del PSF
6	Alta-cercana a la saturación	Alta-similar etapa 5 (según PS)	En disminución (disminuyen ambos bulbos, en mayor medida la T°bs)	CH en madera más seca ≤ 2%
7	Alta-cercana a la saturación	En disminución	Baja, tendiendo a 0°C (reducción T°bs)	HEH=CH final deseado
8	En disminución (compatible con la HR% exterior)	En disminución (compatible con la T° exterior)	En disminución (compatible con T° y HR% exterior)	CH final deseado
9	Alta (saturado con vapor 80-100°C)	Valor medio del PS	Baja, tendiendo a 0°C (aumentan T°bs y en mayor medida T°bh)	CH entre 18-14%

*T°bs: temperatura del bulbo seco; T°bh: Temperatura del bulbo húmedo; PSF: punto de saturación de las fibras; PS: programa de secado.

Tabla 5.2. Etapas y condiciones generales del proceso de secado.

Fuente: adaptada de JUNAC (1989).

La **etapa 1** consiste en el **calentamiento del horno**, comienza al iniciar el proceso (encendido de la cámara) y tiene la función de igualar la T° de la cámara y sus elementos; finaliza cuando se llega a la T° inicial del PS. Se mantiene el ambiente en saturación.

La **etapa 2** (preparatoria) consiste en el **calentamiento al interior (corazón) de la madera**, comienza con la T° inicial del PS y tiene como función aumentar la T° interna de la madera; su finalización depende de su espesor y densidad. Se mantiene el ambiente en saturación.

La **etapa 3** consiste en el **secado efectivo por encima del PSF**; comienza al finalizar la etapa preparatoria y finaliza cuando las fibras exteriores de la madera alcanzan un CH cercano al PSF, cuyo valor teórico es 30%.

La **etapa 4** consiste en el **secado efectivo en la zona del PSF** (o calentamiento intermedio); comienza al finalizar la etapa anterior y finaliza cuando se logra un CH < 30% en el sensor más húmedo de la carga de madera.

La **etapa 5** consiste en el **secado efectivo por debajo del PSF**; comienza al finalizar la etapa anterior y finaliza cuando se logra un CH inferior al 2% del valor final deseado.

La **etapa 6** consiste en la **igualación** y tiene como función homogeneizar la humedad de la carga; comienza cuando el CH del sensor más seco se iguala con el deseado en la madera, y finaliza cuando el CH en el sensor más húmedo se iguala con el deseado en la madera.

La **etapa 7** consiste en el **acondicionamiento** y tiene como función disminuir y/o liberar tensiones de secado y disminuir el GH; comienza al finalizar la etapa anterior y su finalización depende de la especie y las tensiones y/o defectos generados en el proceso. El mismo se realiza con ambiente en saturación.

La **etapa 8** consiste en el **enfriamiento** y tiene como función disminuir la T° de la cámara; comienza al término de la etapa anterior y finaliza cuando la T° de la madera es compatible con la del ambiente. Cabe aclarar que la Δ psicrométrica (diferencia entre T°_{bs} y T°_{bh}) indica una HR alta, cuando su valor es pequeño (poca evaporación), y una HR baja, cuando su valor es alto (mayor evaporación y, por lo tanto, mayor enfriamiento).

La **etapa 9** consiste en el **re-acondicionamiento** de la madera cuya función es la corrección del colapso, las tensiones y/o el restablecimiento del GH. Es una etapa eventual debido a que no en todas las especies ni en todas las ocasiones, se dan estas consideraciones.

El método de control empleado en la etapa 7 de acondicionamiento, es llevado a cabo mediante higrómetros y a través del uso de diferentes probetas.

Los **higrómetros** son equipos que permiten controlar la humedad en las pilas de madera y están constituidos por 4 a 6 sensores inalámbricos distribuidos entre las mismas. Son equipos, no destructivos o pseudo-no destructivos, de determinación indirecta del CH.

Las **probetas** empleadas son:

Probetas testigos de contenido de humedad: al igual que los higrómetros, cumplen la función de verificar, con mayor exactitud, el CH durante el proceso y generalmente, se emplean para especies valiosas. Las mismas son obtenidas de material representativo de la carga (4 a 6 tablas), tal como se indica en la Figura 5.13.

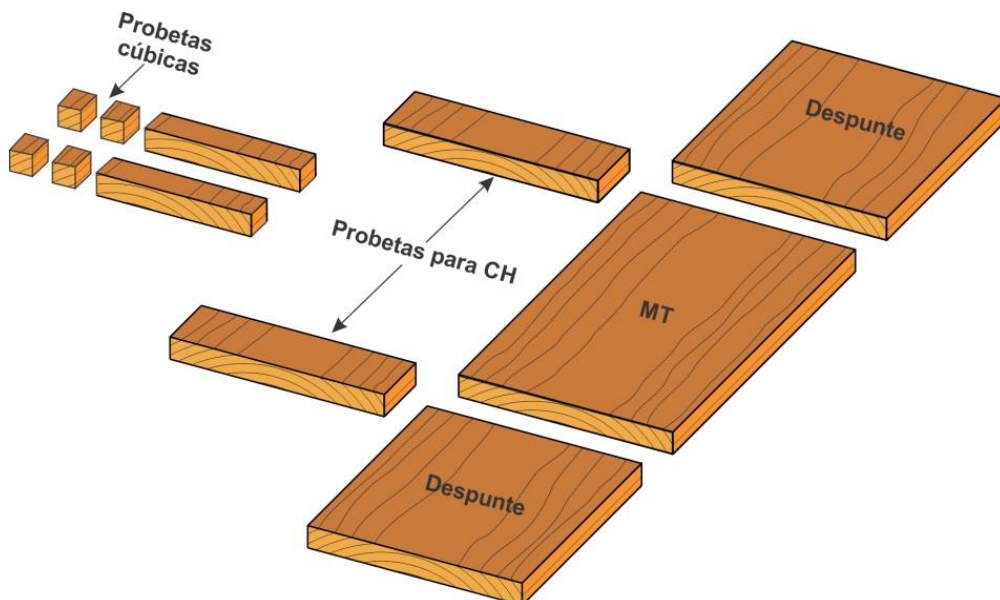


Figura 5.13. Probetas de contenido de humedad.
Fuente: adaptada de JUNAC (1989).

Seleccionado el material del cual se obtendrán las probetas, en primer término se eliminan aproximadamente 50 cm de ambos extremos (despuntos) por tener menor humedad que el centro de la tabla, y por lo tanto, ser menos representativos de la humedad de la pieza. Luego se obtiene una muestra testigo (MT), que es con la que se chequeará el CH durante todo el proceso. De la muestra testigo, se obtienen dos probetas para CH, de las cuales a su vez, se obtienen probetas cúbicas de 20 mm de lado (IRAM 9532, 1963) que son las que se pesan (Ph, en g) y posteriormente se colocan en estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta peso constante (Po, en g). Con ambos datos de las probetas cúbicas, se determina el CH según Fórmula 5.1; la muestra testigo es pesada para la obtención de su peso húmedo (PhMT, en g) y se toma como premisa que el CH determinado en las probetas cúbicas mediante la Fórmula 5.1, es el CH de la muestra testigo (CHMT, en %). Por lo cual, con dicho CH y el PhMT, se obtiene el Po de la muestra testigo (PoMT, en g), empleando la Fórmula 5.2.

$$\text{PoMT (g)} = \frac{\text{PhMT}}{100 + \text{CHMT}} \times 100 \quad (5.2)$$

Este peso anhidro no variará, por lo cual, servirá como dato de control durante todo el proceso de secado.

Las muestras testigos se distribuyen, en números variables, en distintas partes de las pilas dentro del horno, y se van retirando periódicamente y pesando, acorde a los tiempos de control que sean estipulados; con ese peso (PhMT) y el PoMT calculado en forma teórica, se va calculando el CH de la carga de madera en el horno utilizando la Fórmula 5.1. Se opera de esta manera hasta que el CHMT más húmeda, sea 2% menor que el CH deseado.

Probetas estratificadas: con estas probetas se busca conocer la distribución de la humedad en el interior de la madera. Para ello, al inicio del proceso de secado se introduce una muestra de madera representativa de la carga a secar, que se reprocesa al finalizar el secado como se indica en la Figura 5.14. Posteriormente, se pesan (peso inicial) separadamente las partes externas (a), intermedias (b) e internas (c) obtenidas de la muestra y se colocan en estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar su peso constante (peso final, anhidro). Con ambos datos, se determina el CH de las tres partes (Fórmula 5.1) y se determina la diferencia entre la zona (a) y la zona (c), la cual no debe ser superior al 2% de CH.

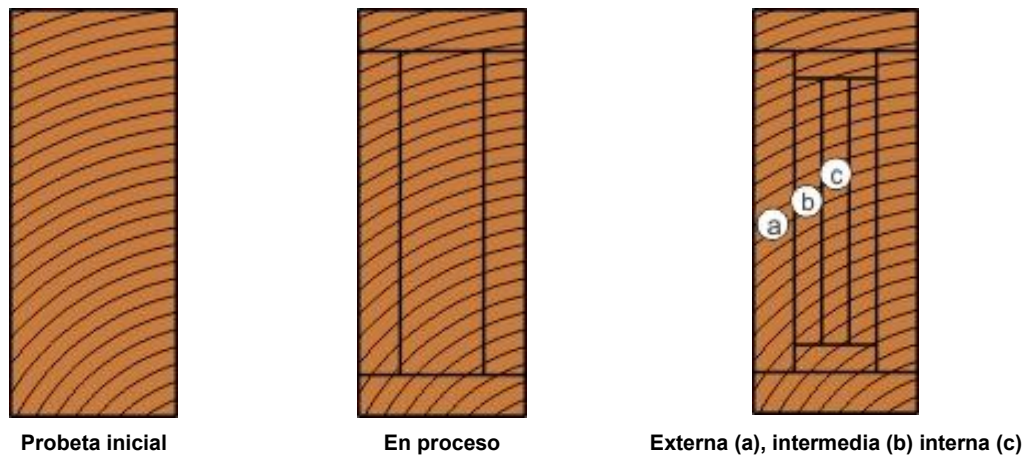


Figura 5.14. Probeta estratificada.
Fuente: adaptada de JUNAC (1989).

Probetas tenedor: sirven para comprobar el comportamiento de la madera frente a diversas tensiones de secado. La misma se elabora aserrando una pieza de madera tal como se indica en la Figura 5.15, eliminando la sección 2 y 5 indicada. Luego del proceso de secado se evalúa su comportamiento atendiendo a las siguientes especificaciones: tabla libre de tensiones (a); secado parcial en las partes exteriores (b); tensiones fuertes (c); acondicionado excesivo (d).

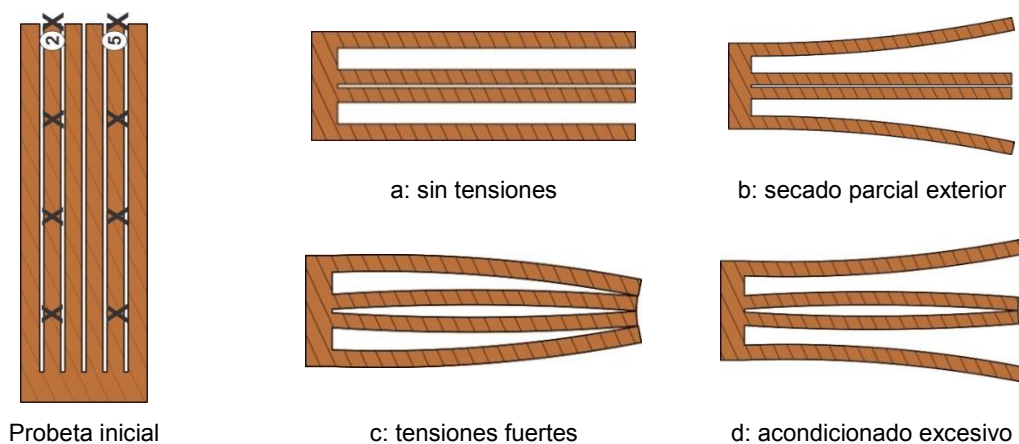


Figura 5.15. Probeta tenedor: comportamiento durante el proceso de secado.
Fuente: adaptada de JUNAC (1989).

De todos modos, el método de utilización de probetas más empleado es el TRADA (*Timber Research and Development Association*). Éste consiste en la utilización de probetas en forma de U (probeta con “dos dientes”) con dimensiones preestablecidas de acuerdo a lo indicado en la Figura 5.16. Una vez obtenida la probeta y expuesta al proceso de secado, la misma se coloca sobre una hoja A4 que tiene esquematizada tres desviaciones (1: ligero; 2: moderado y 3: fuerte) y se determina la clasificación realizando la lectura en la parte exterior del diente izquierdo, repitiendo posteriormente el procedimiento con el diente derecho (Figura 5.16). El resultado final se obtiene como promedio de las dos determinaciones.

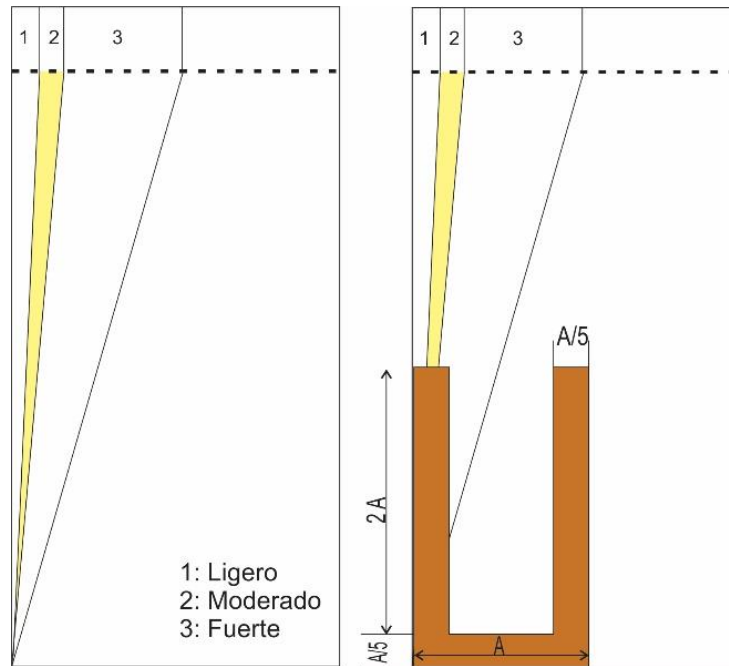


Figura 5.16. Método TRADA.
Fuente: adaptada de Atencia (s.f.)

Para finalizar la temática de secado, en la Tabla 5.3 se resumen las principales ventajas y desventajas de los dos procesos antes desarrollados.

Secado natural		Secado técnico en cámara	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Reducido monto de inversión	Tiempos de secado prolongados (4-10 meses para tablas de 25 mm de espesor) ¹⁷ .	Tiempos de secado reducidos (10-30 días) ¹⁸ .	Elevado monto de inversión inicial y costo de producción
Escasos gastos de mantenimiento y funcionamiento	Capital inmovilizado por períodos prolongados.	Capital inmovilizado por períodos breves.	Mayores gastos de mantenimiento y funcionamiento
No requiere personal capacitado	Permite secar la madera hasta el HEH del ambiente de estibado.	Permite secar la madera al CH final deseado	Requiere personal capacitado
	No permite corregir defectos que puedan aparecer durante el secado ¹⁹ .	Permite corregir defectos de secado ²⁰	

Tabla 5.3. Ventajas y desventajas de los procesos de secado.

¹⁷ La duración del proceso depende de la zona y época del año, como así también de la especie maderera.

¹⁸ Depende de la especie y el espesor.

¹⁹ Se refiere básicamente a corrección de colapso por vaporización; la corrección por cepillado es posible.

²⁰ Se refiere principalmente a defectos de colapso reversible.

Evaluación visual de la madera

Esta etapa se puede dividir en dos partes principales:

- reconocimiento, inspección y medición de las anomalías en la madera.
- clasificación no destructiva: visual resistente y otros métodos.

Reconocimiento, inspección y medición de las anomalías en la madera

Se conoce por **anomalías**, a cualquier irregularidad o imperfección de la madera, que afecte sus propiedades físico-mecánicas, químicas y/o estéticas, determinando una limitación a su uso o aplicación. Dichas anomalías pueden deberse a la **constitución anatómica** de la especie (ej. nudos), a la presencia de **ataques biológicos** (ej. mancha azul), al proceso de **secado** (ej. alabeos) o bien al **procesamiento de la madera** (ej. cepillado desgarrado), dando lugar a los diferentes tipos de anomalías que se resumen en la Tabla 5.4.

Anomalías		
Defectos (D)		Alteraciones (A)
Afectan propiedades físico-mecánicas		Afectan las propiedades químicas, pudiendo o no, afectar las propiedades físico-mecánicas
De estructura (E)	De forma (F)	
No afecta la forma de la pieza	Afectan la forma de la pieza	

Tabla 5.4. Tipos de anomalías.
Fuente: propia (2008).

Conocidas e identificadas dichas anomalías se procede a su medición siguiendo las normativas de clasificación visual específicas, las cuales establecen las formas de determinación y los límites establecidos para que dichos defectos puedan ser aceptados en las piezas de madera, sin perjudicar su condición de uso estructural.

A continuación se detallan las anomalías de mayor frecuencia y consideración en las normas. Entre paréntesis se indica si se corresponden a defectos de forma (DF), de estructura (DE) o alteraciones (A).

- **Nudosidad-Nudos (DE)**: área de tejido leñoso resultante de rastros dejados por el desarrollo de una rama, cuyos caracteres organolépticos y propiedades son diferentes a la madera circundante. En general, tienen un efecto más importante en tensión (tracción) que en compresión, por lo que, en una viga solicitada a flexión, el efecto depende de la posición en que se encuentre (zona superior comprimida o zona inferior tensionada-traccionada). Asimismo, en zonas comprimidas tienen un efecto similar en cualquiera de las posiciones que se encuentre, mientras que en zonas traccionadas, los nudos en el canto causan una excentricidad que inducen o generan

tensiones de estrés, siendo más restrictivos. Los nudos en la capa neutra (zona central) tienen poco o ningún efecto en la sollicitación a flexión. Por su parte, tienen más influencia en la resistencia (MOR: módulo de rotura) que en la rigidez (MOE: módulo de elasticidad) de la pieza. En la resistencia, su efecto depende, además de su localización, de la proporción que afecta en la pieza y de la distribución del estrés en la misma. Por lo cual, los límites establecidos por las normas para los nudos suelen estar en relación a la proporción del ancho de la cara que afectan (nudos de cara, A) o del canto (nudos de canto, B) (Kretschmann Cap. 5, 6, 2010; Wiedenhoeff, 2010). Si son nudos de cara o de canto, se tiene en cuenta la proporción que afectan de dichas superficies (Figura 5.17); si son de arista, o sea, están ubicados en dos superficies contiguas, se considera a la superficie más afectada (la que lo corta más perpendicularmente) y posteriormente, se determina la proporción como en el caso anterior; si son nudos agrupados y se encuentran solapados, se mide en la dirección transversal como un área única; cuando son agrupados pero no se encuentran solapados, se mide y suma el diámetro de cada nudo. Cabe aclarar que un nudo es considerado agrupado cuando la distancia entre centros, medida en dirección longitudinal al eje de la pieza, es menor que el ancho de la pieza o, inferior a 150 mm, si el ancho de la pieza sobrepasa los 150 mm (Fernández Golfín Seco *et al.*, 2003).

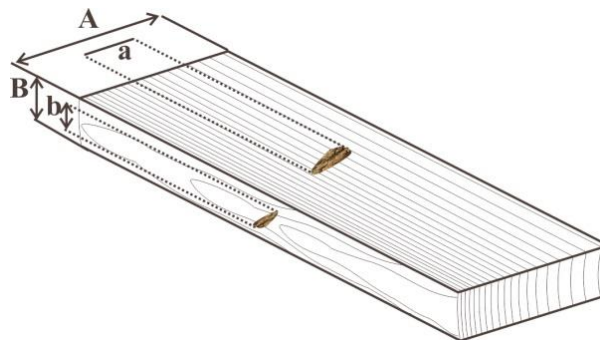


Figura 5.17. Nudos de cara y canto.
Fuente: Spavento (2015).

- **Fisuras pasantes (rajaduras)-fisuras no pasantes (grietas) (DE):** separación de los elementos constitutivos de la madera, cuyo desarrollo puede afectar o no, dos caras de una pieza aserrada y/o escuadrada. Cuando la fisura es pasante se denomina rajadura y cuando la fisura no es pasante se denomina grieta. Algunas normas no las diferencian entre pasantes y no pasantes y las mencionan como un único defecto denominado fendas (Kretschmann Cap. 7, 2010). Se registra su longitud (L) en el sentido paralelo al eje de la pieza (Figura 5.18).

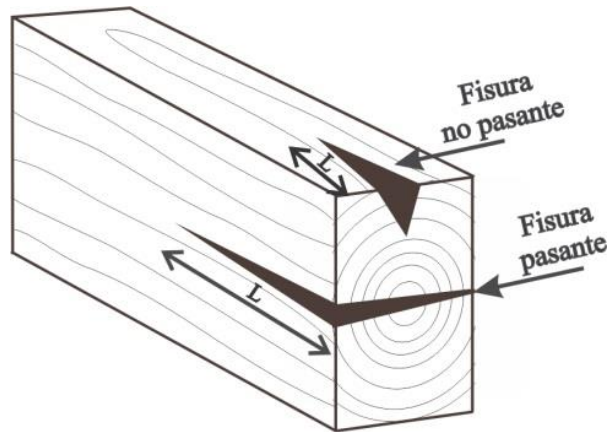


Figura 5.18. Tipos de fisuras.
Fuente: propia (2021).

- **Dirección (o desviación) de fibra-Inclinación del grano (DE):** desviación angular de las fibras con respecto al eje longitudinal o al centro de la pieza. En términos generales, grandes desviaciones de fibras son indeseables porque la madera tiende a deformarse con cambios en el contenido de humedad, siguiendo el patrón de la fibra; el estrés causado por los cambios dimensionales durante el secado de la madera, es mayor en piezas de mayor tamaño y con grano inclinado; la inclinación de las fibras causada por la presencia de un nudo, es considerado como parte del mismo (Kretschmann Cap. 5, 7, 2010). En general, esta singularidad (x) es medida en relación al eje longitudinal de la pieza (y), y se calcula como el cociente entre ambos (x/y) (Figura 5.19).

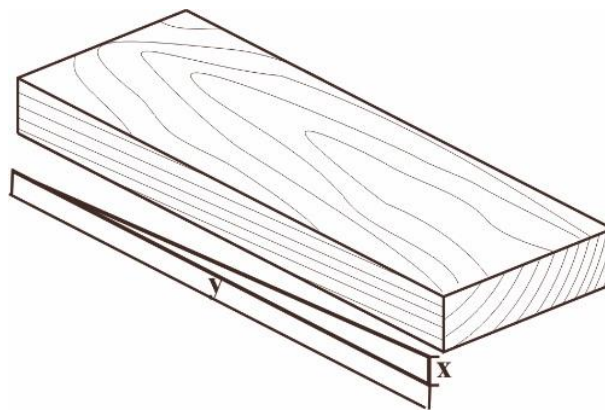


Figura 5.19. Desviación de las fibras.
Fuente: Spavento (2015).

- **Madera de reacción (DE):** en varios aspectos, es similar a la madera juvenil que se detallará más adelante, pero se forma en el árbol por diferentes motivos. Cualquier árbol, de cualquier edad, puede formar madera de reacción cuando una rama o tronco es desviada desde la dirección vertical 1 o 2 grados; por lo que todas las ramas no verticales forman considerable cantidad de esta madera, la cual difiere anatómicamente entre coníferas y latifoliadas. En coníferas, se forma en la parte inferior del tronco o rama gruesa inclinada y es denominada madera de compresión. Se caracteriza por presentar fuerte excentricidad, anillos de crecimiento anormalmente

anchos, densidades anormalmente elevadas, traqueidas cortas, células deformes con gran ángulo microfibrilar en la capa S2, alto grado de contracción longitudinal y alto contenido de lignina (Kretschmann Cap. 5, 2010; Timmel, 1986 tomado de Wiedenhoef, 2010). Su principal inconveniente radica en que dicha contracción longitudinal es anormal y excesiva, pudiendo causar fuertes deformaciones de cara o canto en las piezas. En latifoliadas, este tipo de madera se forma en la parte superior del tronco o rama gruesa inclinada y se denomina madera de tracción (Desch & Dinwoodie, 1996; Bowyer *et al.*, 2003 tomados de Wiedenhoef, 2010); las fibras fallan para formar una pared secundaria apropiada y en su lugar forman una capa de pared altamente celulósica llamada capa G o capa gelatinosa (Wiedenhoef, 2010). En ambos casos, se determina como proporción del ancho de la cara o canto que involucra.

- **Arista faltante-gema (DE)**: superficie redondeada que se manifiesta sobre las aristas de la pieza de madera aserrada; ésta mantiene la curvatura original de la troza con presencia o ausencia de corteza. Generalmente, su efecto suele ser pequeño y tan sólo puede ocasionar dificultades a nivel constructivo porque la sección de la pieza no resulta perfectamente rectangular, o bien, porque falta una parte de la pieza (Kretschmann Cap. 7, 2010; Esteban Herrero, 2003). Se determina como la proporción del ancho (h_1/h), espesor (b_1/b) o longitud (l/L) que afecta en la pieza de madera aserrada (Figura 5.20).

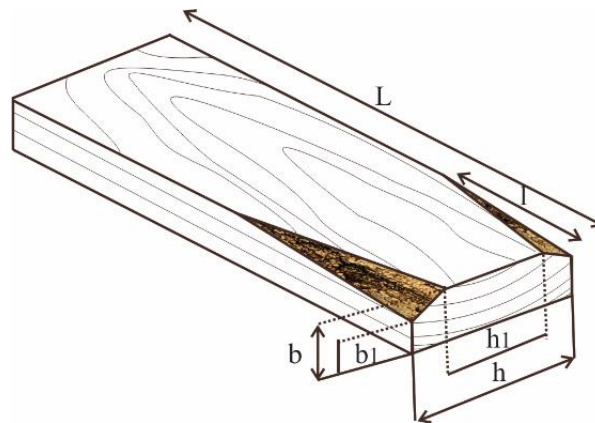


Figura 5.20. Arista faltante-gema.
Fuente: Spavento (2015).

- **Médula (DE)**: es la zona situada en el interior del primer anillo de crecimiento o zona central de la pieza de madera, constituida fundamentalmente por tejido blando, cuya estructura anatómica difiere del resto de la madera. En términos generales, el problema de su presencia no radica en la influencia en la resistencia global de la pieza, sino más bien, en que la madera de su proximidad puede ser madera juvenil. Por este motivo, en algunas normas se considera cuando se clasifica y comercializa en verde (Fernández Golfín Seco *et al.*, 2003). Se registra su presencia o ausencia (Figura 5.21).

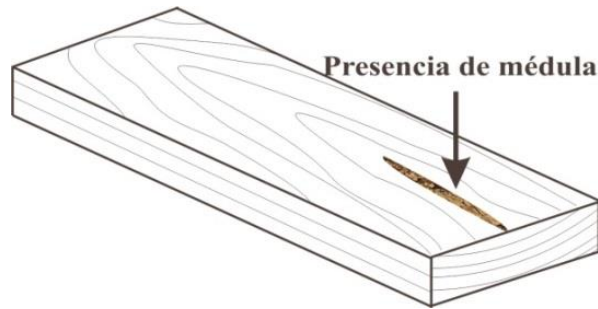


Figura 5.21. Médula.
Fuente: Spavento (2015).

- **Acebolladura (DE):** separación total o parcial del leño entre dos anillos consecutivos. En general, se determina su presencia o ausencia, aunque puede también determinarse como proporción de la pieza afectada (Figura 5.22).

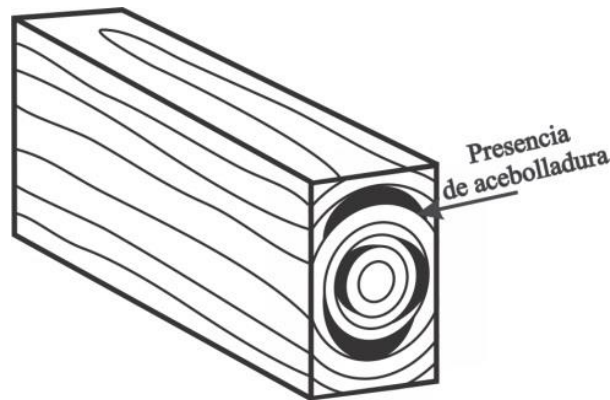


Figura 5.22. Acebolladura.
Fuente: propia (2021).

- **Corteza incluida-entrecasco (DE):** hace referencia a la corteza incluida dentro de la pieza de madera. En términos generales, suelen tener poco efecto en la clasificación resistente si son pequeñas o aparecen en número reducido. Sin embargo, la presencia de grandes cantidades puede ocasionar zonas de debilidad entre los anillos de crecimiento (Kretschmann Cap. 7, 2010). En general, se reporta su presencia o ausencia pero también puede determinarse el número de entrecascos por longitud de la pieza (Figura 5.23).

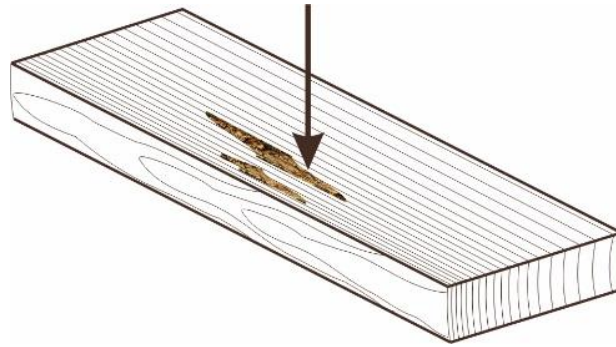


Figura 5.23. Corteza incluida.
Fuente: Spavento (2015).

- **Ancho de anillos de crecimiento (DE)**: esta característica tiene relación con la presencia de madera juvenil y su consecuente asociación con defectos de secado. En las normas se puede determinar de dos maneras; por un lado se puede medir la anchura promedio de una determinada cantidad de anillos cercanos a la médula; por otro lado se puede medir la cantidad de anillos cercanos a la médula presentes en una determinada anchura (L) de la cabeza de la pieza (Figura 5.24).

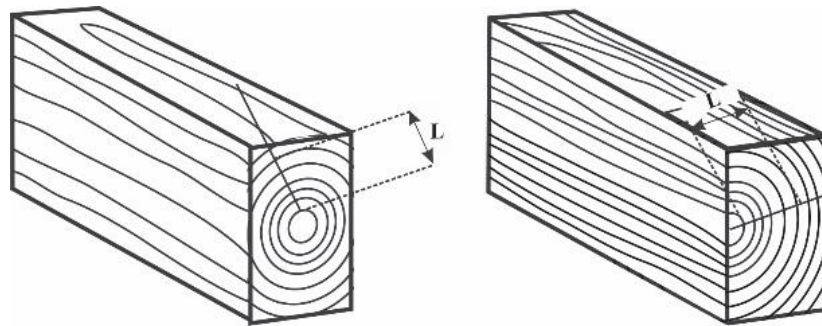


Figura 5.24. Ancho de anillos de crecimiento.
Fuente: Spavento (2015).

- **Madera juvenil (DE)**: en términos generales, es aquella formada durante los primeros estadios (anillos) de crecimiento del árbol y se encuentra cerca de la médula, con estructura y propiedades variables respecto a la madera exterior madura. En la cara transversal de la pieza pueden observarse anillos anormalmente anchos acompañados por una fuerte curvatura. Junto con la madera de reacción, suele ser la causa de deformaciones de cara y canto durante el proceso de secado; incluso, algunas normas las consideran juntas porque comparten características químicas, celulares y fisiológicas similares, aunque cada una puede o no estar presente en una pieza de madera. Presenta propiedades físicas y mecánicas considerablemente inferiores a las de la madera madura a causa de una morfología celular alterada. En este sentido, en lugar de poseer células largas y rectas, posee células cortas, desviadas (con ángulos microfibrilares hasta 10 veces superior a la madera madura), retorcidas o dobladas (Wiedenhoeft, 2010; Ilic *et al.*, 2003). En consecuencia, presenta una fuerte tendencia a sufrir

contracciones longitudinales cuando la madera es sometida a procesos de secado, o ante variaciones en el contenido de humedad, resultando en un material propenso a formación de grietas y rajaduras, y deformaciones.

- **Alabeos-deformaciones (DF):** bajo este término, se considera cualquier desviación de cara o canto de una pieza de madera con respecto a su eje longitudinal, transversal o ambos. Pueden ser producidas por diferencia de contracción entre la cara radial, tangencial y transversal durante el proceso de secado, por estrés de crecimiento (madera de reacción) o por una combinación de ambas. A su vez, éstas pueden ser agravadas por la distorsión del grano como así también por la presencia de madera juvenil. En términos generales, su determinación se realiza midiendo la desviación de la cara, canto o ambos en el sentido longitudinal o transversal de la pieza, respecto a situación ideal recta (sin desviación).

Las deformaciones más importantes en madera aserrada son (Bergman, 2010):

Curvatura de cara, combado o arqueado (*bow*): alabeo de la cara en sentido longitudinal. Se determina la deformación (a) sobre una longitud de 2 metros (Figura 5.25).

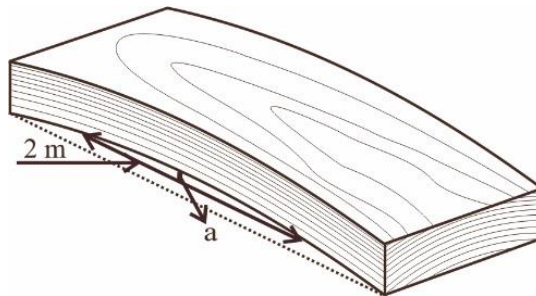


Figura 5.25. Curvatura de cara.
Fuente: Spavento (2015).

Curvatura de canto o encorvado (*crook*): alabeo de los cantos en sentido longitudinal. Se determina la deformación (a) sobre una longitud de 2 metros (Figura 5.26).

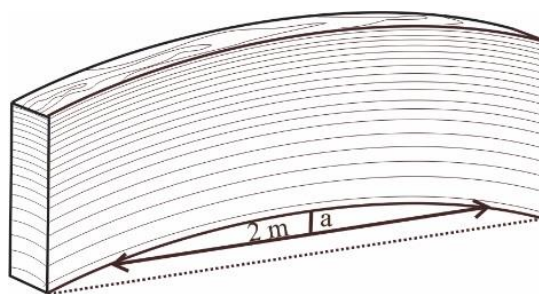


Figura 5.26. Curvatura de canto.
Fuente: Spavento (2015).

Abarquillado o atejamiento (*cup*): alabeo en la dirección transversal. Se mide como la deformación máxima (a) en relación al ancho de la pieza (Figura 5.27).

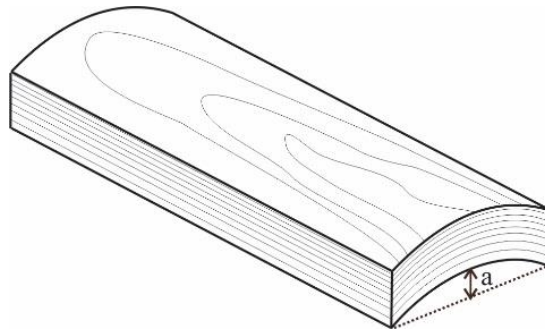


Figura 5.27. Abarquillado.
Fuente: Spavento (2015).

Revirado o alabeo (*twist*): deformación que experimenta una pieza de madera que se manifiesta por la curvatura de los ejes longitudinal o transversal, o ambos a la vez. Se determina la deformación (a) sobre una longitud de 2 metros (Figura 5.28).

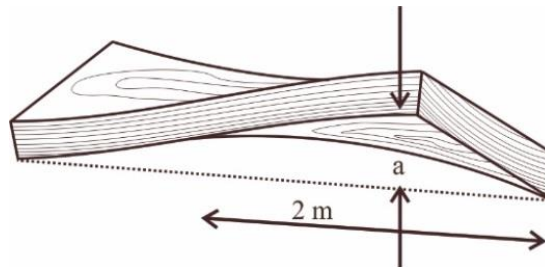


Figura 5.28. Revirado.
Fuente: Spavento (2015).

Rombo (*diamond*): escuadría irregular. Se determina la desviación (d) respecto al plano normal (Figura 5.29).

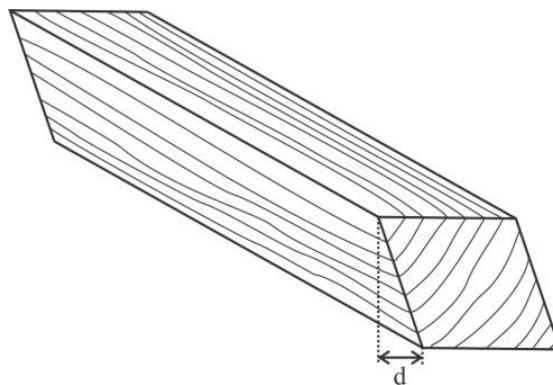


Figura 5.29. Rombo.
Fuente: propia (2020).

- **Ataques biológicos (A)**: se consideran dentro de este grupo a los defectos causados por hongos de pudrición (castaña, blanca y/o blanda), hongos cromógenos (manchas) e insectos (orificios). Algunas normas internacionales consideran dentro de esta categoría la presencia de plantas parásitas (muérdago). En todos los casos, se determina su presencia y/o tamaño-cuantía.

- **Otros:** se incluye dentro de este grupo a los daños mecánicos, los depósitos o bolsas de resina y a otros defectos que, en términos generales, no son considerados como los más importantes dentro de las normas de clasificación visual, pero que pueden determinarse por analogía con alguna característica similar.

Clasificación visual

El proceso de clasificación visual permite agrupar piezas o lotes de madera por grados de calidad visual y resistente, con la finalidad de ofrecer madera de calidad constante y acorde a las condiciones de uso estructural. De esta manera, posibilita al vendedor mejorar sus precios de venta, y al consumidor, disminuir las pérdidas de material, tiempo, mano de obra y costos. Por lo cual, es un proceso de homogeneización de calidad estructural que beneficia a ambas partes de la cadena foresto-industrial constructiva.

La clasificación visual puede considerarse una técnica de ensayo no destructivo (NDT, *Non-destructive Testing*) ya que permite examinar la madera sin que se vean afectadas sus propiedades, integridad y utilidad final. El objetivo de la misma es que a través de la observación y medición de defectos se pueda clasificar la madera en grados de calidad, que a su vez se asocien a clases o **grados resistentes** del lote. Estos grados resistentes son obtenidos a través de ensayos mecánicos destructivos; en general, a través del ensayo de flexión estática y de los parámetros de resistencia (MOR) y rigidez (MOE), junto con el valor de densidad obtenido a través del ensayo físico destructivo.

Para esta asignación resistente, el valor exigido actualmente por la normativa de cálculo es el **valor característico**, entendiendo como tal, al valor correspondiente a un fractil de la distribución estadística de una propiedad de la madera (IRAM 9664, 2013). En términos generales, es aquel que garantiza que el 95% de las piezas de un lote de madera tenga una resistencia igual o superior a dicho valor. Posteriormente, en el proceso de cálculo se introducen los coeficientes de seguridad o factores de corrección, a fin de lograr las tensiones admisibles requeridas por los reglamentos técnicos constructivos, teniendo en cuenta para ello el material y las condiciones de exposición (CIRSOC 601, 2016; Fernández Golfín Seco *et al.*, 2003).

Por su parte, una de las principales desventajas de las normas de clasificación visual radica en que están diseñadas para especies, procedencias y tamaños muy concretos, dejando normalmente fuera de clasificación a la madera de gran escuadría o a especies madereras de interés (Carballo Collar *et al.*, 2009; Íñiguez González *et al.*, 2007; Esteban Herrero, 2003; Fernández Golfín Seco *et al.*, 2003; Hermoso, 2001). De todos modos, cuando no existe una norma que regule las condiciones para una región o especie en particular, se suele aplicar una normativa con requerimientos análogos adaptable a esa especie a clasificar; en términos generales, se realiza por similitud de grupo taxonómico, ya sea conífera o latifoliada, y dentro de ellas, por similitud de características tecnológicas, por ejemplo, densidad.

Las normas de clasificación son establecidas por entes nacionales de regulación. En Argentina, se realiza a través del Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). Las normas de madera aserrada estructural actualmente vigentes en nuestro país son:

- **IRAM 9662 (2015):** *Madera laminada encolada estructural: clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 1:* Tablas de pino Paraná (*Araucaria angustifolia*). Misiones; **Parte 2:** Tablas de eucalipto grandis (*Eucalyptus grandis*). Mesopotamia Argentina; **Parte 3:** Tablas de pino taeda y pino elliotii (*Pinus taeda* y *elliottii*). Misiones y Corrientes; **Parte 4:** Tablas de álamo (*Populus deltoides* 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67'). Delta del Río Paraná. Estas normas establecen un sistema de clasificación visual por resistencia de tablas aserradas destinadas a la fabricación de elementos estructurales laminados encolados, y de tablas para uso estructural flexionadas de plano aunque no formen parte de un elemento laminado encolado.

- **IRAM 9670 (2002):** *Madera estructural: clasificación y requisitos. Clasificación en grados de resistencia para la madera aserrada de pinos resinosos (Pino elliotii y Pino taeda) del noreste argentino mediante evaluación visual.* Esta norma establece una clasificación resistente a partir de la evaluación visual de los defectos de la pieza de madera; dicha clasificación se aplica para madera aserrada de pinos resinosos destinada a elementos estructurales utilizados principalmente, bajo esfuerzos de flexión con CH de $15 \pm 3\%$, considerando escuadrías nominales comerciales, tablas y vigas. También puede emplearse para piezas que sean sometidas a otros esfuerzos, pero no para madera maciza que se emplee en la elaboración de vigas laminadas.

Como puede observarse, las normas IRAM 9662-3, IRAM 9662-4 e IRAM 9670 están establecidas para un grupo de especies. Esto es así dada la poca o nula diferenciación, de manera práctica, de estas especies en el mercado. Para el caso específico de las dos especies de *Pinus* consideradas en la norma IRAM 9662-3 e IRAM 9670, esta falta de diferenciación ha hecho que en el mercado se los conozca y comercialice bajo la denominación de pinos resinosos, siendo incluso considerado como grupo de especie en las reglas nacionales de diseño estructural (Fank *et al.*, 2017; CIRSOC 601, 2016).

Todas estas normas nacionales establecen dos clases de calidades diferentes; la primera, designada como Clase 1 (o Grado 1 en la Norma IRAM 9670), constituyendo la mejor calidad estructural, mientras que la segunda, designada como Clase 2 (o Grado 2 en la Norma IRAM 9670), constituye la peor calidad estructural. Toda la madera que no pertenezca a ninguna de estas clases es considerada como rechazo y por lo tanto, no apta para usos estructurales. Si bien cada país establece diferentes grados de calidad, a medida que éstos aumentan, el trabajo del clasificador resulta más dificultoso.

A través de las normas de clasificación visual se determinan los defectos de la madera y en consecuencia, la clase visual correspondiente, la cual además se asocia a asignaciones resistentes preestablecidas. Para la obtención de los valores resistentes indicados en estas normas, previamente fue necesario realizar ensayos destructivos que permitieron determinar los valores característicos resistentes de esas maderas-procedencias. Para ello, la normalización argentina cuenta con las siguientes normas:

- **IRAM 9663 (2013):** *Estructuras de madera: madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural: determinación de las propiedades físicas y mecánicas.* Ésta establece los métodos para el acondicionamiento del material, la determinación de diferentes propiedades mecánicas (en material con diferentes secciones y uniones) y parámetros, tales como módulo de elasticidad local (MOE_{local}), global (MOE_g) y resistencia a la flexión (MOR). Asimismo, establece las determinaciones de CH y densidad del material.

- **IRAM 9664 (2013):** *Madera estructural: determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad.* La misma proporciona un método para determinar los valores característicos de las propiedades mecánicas y de la densidad en poblaciones de madera aserrada de calidades definidas. Proporciona correcciones por diferencia en contenido de humedad, la cual debe ajustarse al 12%; correcciones por dimensiones de la pieza; y establece el número de muestras a ensayar proporcionando un “castigo estadístico” en el caso que no se cumpla ese tamaño muestral.

Una vez ensayado el material atendiendo a las clases visuales previamente establecidas en las normas de clasificación visual, se asigna una clasificación resistente acorde a sus valores característicos.

En resumen, el proceso clasificatorio, teniendo en cuenta la normativa nacional podría resumirse como:

- Identificación y medición de defectos atendiendo a las normas visuales correspondientes según especies y procedencias (IRAM 9662: partes 1 a 4, 2015; 9670, 2002).
- Asignación de clases visuales (por defectos), atendiendo a las normativas correspondientes según especies y procedencias (IRAM 9662: partes 1 a 4, 2015; 9670, 2002).
- Realización de ensayos mecánicos destructivos (IRAM 9663, 2013).
- Determinación y asignación de valores característicos resistentes (IRAM 9664, 2013).

Un aspecto fundamental a destacar es que las normas de clasificación visual resistente, clasifican a las piezas individualmente, pero la asignación de resistencia corresponde al lote. Esto significa que, un lote de madera de una determinada especie y calidad que sale del aserradero, tendrá en su conjunto una determinada resistencia, la cual es establecida en la norma. Pero si en dicho lote, y con posterioridad a la clasificación resistente, se procediera a extraer piezas de madera de forma no aleatoria (por ejemplo, seleccionando las de mejor aspecto para destinarlas a carpintería o a usos más selectos), el lote restante podría no tener la resistencia característica inicial. Por dicho motivo, los aserraderos o comercializadores de madera, no deben permitir bajo ningún concepto que se realicen clasificaciones posteriores sobre la madera previamente clasificada desde el punto de vista resistente. Esto se debe a que la norma da como resistencia de cualquier combinación especie-calidad, el valor característico de la resistencia (5^{to} percentil del MOR) de todas las piezas del lote, por lo que si con posterioridad a la clasificación resistente se quitan piezas con mejor aspecto, se están quitando, en definitiva, las de mayor resistencia, motivo por el cual el valor característico del lote residual descende cuanto más piezas con estas características se extraigan. El límite inferior de resistencia del lote depende de la resistencia de

las peores piezas, o sea de las piezas con MOR por debajo del 5^{to} percentil en el lote inicial (Fernández Golfín Seco *et al.*, 2003).

Por su parte, este proceso clasificatorio debe ser considerado en los cálculos de diseño constructivo. Para ello, a nivel nacional existen los siguientes documentos reglamentarios:

- **Reglamento argentino de estructuras de madera (CIRSOC 601, 2016).** *Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera en edificaciones.* Este reglamento define los métodos y disposiciones generales a emplear en el diseño y construcción de estructuras para edificaciones y obras civiles con madera aserrada, madera laminada encolada y productos derivados de la madera, como así también los métodos a emplear en el diseño y fabricación de uniones simples y múltiples.

El mismo está organizado en capítulos y suplementos. En los capítulos se desarrollan los conceptos principales sobre: los requerimientos generales para el diseño estructural; los valores de diseño; las disposiciones y ecuaciones para el diseño; el diseño de miembros estructurales de madera aserrada y de madera laminada encolada estructural; de miembros estructurales de sección transversal circular; de vigas prefabricadas, madera compuesta estructural y tableros estructurales; y el diseño de uniones mecánicas y de sistemas estructurales. En los suplementos se especifican los valores de diseño de referencia para: madera aserrada clasificada por resistencia, acorde a las normativas anteriormente mencionadas (9662:1-4; 9670), y acorde a apéndices específicos definidos en algunos de los suplementos; para madera laminada encolada estructural; para miembros estructurales de sección circular; y los valores de diseño de referencia para uniones mecánicas.

Dicho reglamento considera únicamente los requisitos relacionados con el comportamiento mecánico y durabilidad de las estructuras, sin tener en cuenta aspectos tales como, aislamiento térmico y acústico, entre otros; asimismo, si bien no se excluye la utilización de otros materiales, métodos de diseño y sistemas estructurales, debe demostrarse que tendrán un desempeño satisfactorio para el uso destinado. Tampoco se incluye el diseño y la construcción de puentes, las estructuras sometidas a la acción del fuego, entre otros.

- **Manual de aplicación de los criterios de diseño adoptados por el Reglamento CIRSOC 601 (2016) (CIRSOC, 2016).** *Con ejemplos desarrollados y comentados y tablas auxiliares para el cálculo.* Tiene como objetivo facilitar la interpretación de las reglas de diseño adoptadas por el Reglamento CIRSOC 601 (2016).

El documento contempla ejemplos resueltos y comentados sobre problemáticas del diseño estructural con madera y tablas auxiliares para el cálculo estructural.

- **Guía para el proyecto de estructuras de madera con bajo compromiso estructural en base al reglamento argentino de estructuras de madera CIRSOC 601-2016 (2018) (CIRSOC, 2018).** *Primera Parte: Viviendas de madera de una planta.* Esta guía debe considerarse complementaria al manual, pero a diferencia de éste, la guía focaliza exclusivamente en construcciones con bajo compromiso estructural, particularmente en viviendas, proveyendo soluciones simples para casos relativamente estandarizados.

En primer término, la guía se refiere a la estructura de viviendas de una planta, y está organizada considerando prácticas constructivas usualmente adoptadas en nuestro país, delimitando zonas geográficas de aplicación, cargas consideradas y condición de servicio de la estructura. Las zonas geográficas de aplicación quedan eximidas de la aplicación de los requerimientos de dos tipos de peligros: sismo-resistentes y de la acción de la nieve y del hielo. Asimismo, las soluciones estructurales quedan establecidas de acuerdo al grado de urbanización y la exposición del terreno. Se clasifican en exposición A: centros de grandes ciudades donde al menos 50 % de los edificios poseen alturas por encima de 20 m, entre otras consideraciones sobre dirección del viento y distanciamiento de edificaciones; exposición B: áreas urbanas y suburbanas, arboladas u otros terrenos con numerosas obstrucciones poco espaciadas que tengan el tamaño de residencias unifamiliares o mayores, entre otras consideraciones de dirección del viento y distanciamiento de edificaciones; exposición C: terreno abierto con obstrucciones dispersas que poseen alturas generalmente menores que 10 m; incluye terreno plano abierto y praderas. La guía no contempla la exposición D: áreas costeras planas no obstruidas expuestas a viento soplando sobre aguas abiertas en una distancia de por lo menos 1600 m, entre otras consideraciones de dirección del viento, exposición y distanciamiento de edificaciones; como así tampoco, las situaciones locales de microclimas o zonas topográficas especiales.

En segundo término, la guía presenta la estructura de dos proyectos adoptados como modelos de viviendas, como así también alternativas de solución para los sistemas y componentes estructurales según dimensiones, tipologías, especies y grados estructurales.

Otros métodos de clasificación

Si bien el método NDT más tradicional y ampliamente utilizado para la predicción de las propiedades de la madera, es el de clasificación visual anteriormente desarrollado, existen otros que son factibles de utilizar para tal fin. Los mismos permiten detectar, localizar y medir defectos, determinar propiedades de los materiales, como así también determinar su composición o garantizar su adecuado comportamiento en uso. Entre ellos, los métodos acústicos son los más difundidos después de la clasificación visual. Por ello, en este capítulo se describirá un equipo de ondas sónicas, denominado *Microsecond timer*®, *Fakopp Enterprise*, el cual se encuentra disponible en el LIMAD.

El procedimiento a aplicar con este equipo consiste en generar una onda sónica, en este caso a través de un impacto de martillo, en un sensor o palpador de inicio, y en hacer pasar ese impulso a través de la pieza de madera aserrada (de longitud conocida), hacia el palpador receptor. Por lo cual, el objetivo del ensayo es la medición del tiempo que tarda la onda en recorrer la distancia entre el punto emisor y el receptor. Esta determinación puede realizarse de manera directa, en sentido longitudinal al eje de la pieza, donde cada palpador es colocado en un extremo de la pieza (Figuras 5.30 y 5.31), o bien, de manera indirecta, cuando no se tiene acceso a los extremos de la pieza, como puede ser una viga estructural en servicio.

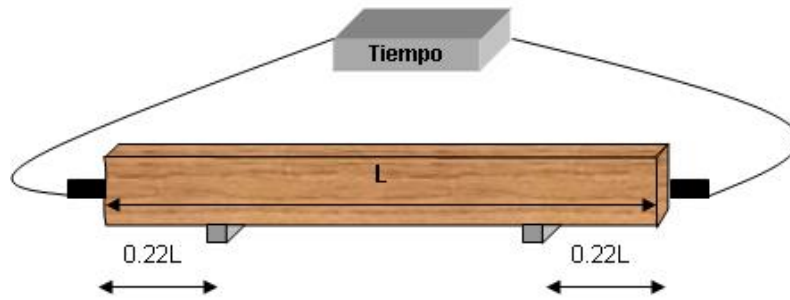


Figura 5.30. Esquema de ensayo acústico.
Fuente: propia (2014).



Figura 5.31. Determinación en laboratorio de ensayo acústico.
Fuente: propia (2014).

Conociendo esa distancia recorrida entre ambos palpadores y el tiempo empleado (indicado en la pantalla del equipo), la velocidad de la onda se determina de acuerdo con la Fórmula 5.3. Conociendo la densidad de la madera, a partir de esta velocidad, se puede determinar el módulo de elasticidad dinámico del material (MOE_d) atendiendo a la Fórmula 5.4.

$$V \text{ (m/seg)} = \frac{d}{t} \quad (5.3)$$

$$MOE_d \text{ (MPa)} = (V)^2 \times \rho \quad (5.4)$$

Siendo: V : velocidad de paso de la onda, en m/seg; d : distancia entre emisor y receptor, en m; t : tiempo transcurrido en la transmisión de la onda, en seg; MOE_d : módulo de elasticidad dinámico, en MPa; ρ : densidad de la pieza de madera, en Kg/m^3 .

El fundamento del uso de esta técnica como método clasificatorio se basa en la buena relación existente entre la velocidad de paso de la onda, o el MOE_d , y el MOE obtenido mediante ensayo destructivo en máquina universal. Por lo cual, conociendo el MOE_d de una especie maderera y su relación con el MOE obtenido en máquina universal de ensayo, es factible utilizar esta metodología para realizar una evaluación clasificatoria de dicho material. Por otro lado, la relación existente entre la V , o el MOE_d , y el MOR en máquina universal es, en términos generales, sensiblemente más baja debido a la presencia de defectos locales ya que, al no ser registrada su magnitud (y en algunos casos, su ubicación), limitan significativamente la carga máxima soportada y consecuentemente, su resistencia (MOR).

Por su parte, estos valores deben ser corregidos al CH de referencia (12%), para lo cual, la humedad del material ensayado debe ser conocida y determinada; la misma puede ser obtenida

mediante evaluación destructiva, método gravimétrico o bien, mediante metodología NDT a través de xilohigrómetros de contacto o de resistencia, detallados anteriormente.

Cabe aclarar que a través de este método acústico (*Microsecond timer*®), una discontinuidad en el material, como puede ser un nudo, aumenta el tiempo de paso de la onda desde el emisor hacía el receptor, por lo que la velocidad de paso de la onda, se ve reducida ante la presencia de un defecto, el cual podría ser considerado, para estos fines, como un “obstáculo”. Pero esta técnica no indica cuán grande es, o donde está ubicado ese “obstáculo”. Por esta razón, las técnicas acústicas en general, incluido el equipo *Microsecond timer*® aquí descrito, alcanzan una mayor precisión cuando se lo emplea conjuntamente con la clasificación visual.

Diversos métodos NDT pueden emplearse para estimar otras propiedades físicas o mecánicas. Un ejemplo de ello lo constituye el *Pilodyn*, el cual consiste en un dispositivo, penetrómetro, que permite calcular la profundidad de penetración de una varilla de 2,5 mm de diámetro en una pieza de madera. Dicha varilla es accionada por un muelle y la profundidad de penetración es registrada en una escala graduada del equipo, con un rango de lectura de 0 a 40 mm y una precisión de 1 mm (Figura 5.32). Por lo cual, tanto la densidad como la dureza de la madera puede estimarse con este equipo dada la relación existente entre dichas propiedades y la profundidad de penetración (Íñiguez González, 2007).



Figura 5.32. *Pilodyn*.
Fuente: GIS Iberica (2020)²¹.

Remanufactura

Esta etapa incluye diferentes procesos que le agregan valor a la madera aserrada. Diversos productos pueden surgir a partir de aquí, pero en este capítulo se desarrollará el procedimiento general de obtención de productos de madera encolada (Kretschmann Cap. 6, 2010; Stark *et al.*, 2010; García Esteban *et al.*, 2002) destacando oportunamente, los equipamientos disponibles y los procesos factibles de realizar en el CTM.

Para ello, se parte de la madera aserrada seca y clasificada. Cuando se fabrican productos estructurales, como vigas laminadas o paneles de madera contralaminada (CLT), dicha

²¹ <http://www.gisiberica.com/equipos%20de%20control%20de%20calidad/QC400.html>

clasificación es más rigurosa, y se realiza a través de las normativas nacionales de clasificación visual por resistencia, anteriormente mencionadas. Cuando se fabrica un producto no estructural, como machimbres, molduras, zócalos, *siding* (revestimiento exterior) o tableros de listones, dicha clasificación es visual y tiene como finalidad, evaluar la presencia de defectos a los fines de que los mismos no influyan en la adhesividad del producto empleado para realizar las uniones, en la trabajabilidad y/o a la estética del producto final.

De todas maneras, en todos los casos, la clasificación debe realizarse ya que sirve para posteriormente efectuar, de ser necesario, el saneado de la madera, a fin de quitar los defectos indeseables, permitiendo producir madera saneada o *clear*, en forma de *block* o bloques que se unirán para formar piezas de mayores dimensiones (*blank* o listón saneado); estos últimos, posteriormente constituirán un producto final con diversas características, calidades y aplicaciones.

El proceso general de remanufactura de la madera consiste en:

- **Cepillado:** mediante este proceso se quitan las irregularidades propias del aserrado de la pieza de madera y además, se logra una mejor visualización de los defectos. La máquina con la que cuenta el CTM para realizar este proceso es una cepilladora, también denominada moldurera, de 4 cabezales en los cuales se colocan las fresas según el trabajo a realizar (Figura 5.33). Estas 4 fresas permiten en una única pasada de la madera a través de ellas, cepillar las dos caras y los dos cantos de la pieza aserrada simultáneamente.



Figura 5.33. Cepilladora-CTM.
Fuente: propia (2020).

- **Saneado:** posteriormente al cepillado, se realiza el saneado de la pieza. Para ello, con la ayuda de una tiza o lápiz, se marca la superficie que debería quitarse en la que se incluya el o los defectos a eliminar (en general, son nudos). Una vez identificada la parte defectuosa se procede a su eliminación a través de una sierra circular. De esta manera, se mejora la calidad estructural o no estructural de la madera utilizada, debiendo luego, reconstruirse las piezas a través de un método de unión. En sistemas de nuevas tecnologías, este proceso es realizado de manera computarizada; la misma máquina identifica y elimina por aserrado los defectos del listón. El CTM no cuenta actualmente con esta línea de trabajo.

- **Método de unión:** a través de esta etapa se brinda la posibilidad de fabricar piezas de grandes longitudes, adecuada resistencia y seguridad, como así también permitir el uso más integral del recurso maderero ya que pueden emplearse piezas de diferentes largos; por ejemplo, pueden utilizarse piezas cortas provenientes del proceso de reaserrado de costaneros. El método más reconocido es el de unión dentada o *finger joint* y consiste en un mecanizado que se aplica a las cabezas de las piezas, aumentando la superficie específica de contacto del material (Figura 5.34). Estas uniones se realizan en máquinas rotativas de gran velocidad que intervienen en las piezas verticalmente (en la cabeza) u horizontalmente (en el canto). El CTM no cuenta actualmente con esta línea de trabajo.

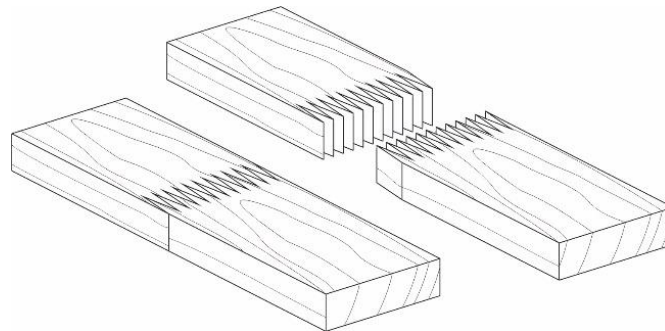


Figura 5.34. Unión *finger joint*.
Fuente: propia (2020).

- **Encolado de cabeza:** esta etapa consiste en la aplicación de adhesivo a la superficie de todos los dientes a encolar (en uniones *finger joint*), lo cual se puede corroborar cuando el adhesivo rebasa por los cuatro lados de la pieza, una vez puestos en contacto a través de presión. Para ello, atendiendo a las especificaciones técnicas, se debe tener en cuenta que la diferencia de CH entre ambas piezas a unir debe ser lo más homogénea posible (variación máxima=4-5%). Asimismo, a fin de evitar que las uniones dentadas tomen suciedad que dificulten el correcto empalme y adhesividad, el encolado debe realizarse antes de las 24 hs de realizado el dentado de la pieza. Posteriormente, se lleva a cabo el prensado de las partes con adhesivos. El mismo se realiza a través de un proceso en frío en sentido paralelo a la dirección de las fibras. El CTM no cuenta actualmente con esta línea de trabajo.

- **Cepillado:** mediante este proceso se quitan los excesos de adhesivos y/o irregularidades que se ocasionaron durante la etapa anterior.

- **Encolado de cantos o caras:** dependiendo del producto de madera encolada a realizar, cada listón saneado es encolado por sus cantos o caras. En el caso del CTM, actualmente se

pueden realizar tableros alistonados; para ello, al no contar con una línea para la producción de listones saneados, se trabaja con el listón de madera maciza aserrada, previamente clasificado; cada listón es encolado por sus cantos para conformar un tablero de hasta 1,20 m de ancho (dimensión máxima a realizar en el CTM). Dichos tableros no presentan un uso estructural, siendo empleados para fabricación de muebles (camas, mesas, entre otros).

- **Elaboración del producto final:** dependiendo del producto final se considerará: el tamaño de las láminas o listón individual a utilizar; el tipo de adhesivo a aplicar y sus especificaciones técnicas en cuanto a mezcla, tiempos de abierto y cerrado, temperatura y humedad de la madera, tiempo de fraguado, temperatura del aire, entre otros; el armado y prensado final del producto (viga laminada, CLT o tablero alistonado); el maquinado final (listones saneados para realizar *siding*, molduras, zócalos, etc) y el acondicionamiento.

- **Prensado:** mediante este proceso se logra la estabilidad del armado de las piezas. En el caso de tableros alistonados, como los que se realizan en el CTM, este proceso es llevado a cabo en frío (temperatura ambiente) en una prensa del estilo “abanico” (Figura 5.35).



Figura 5.35. Prensa tablero de listones-CTM.
Fuente: propia (2020).

- **Escuadrado:** una vez finalizado el proceso de prensado, se realiza el escuadrado del producto. En el CTM es llevado a cabo a través de una escuadradora de mesa (Figura 5.36).



Figura 5.36. Escuadradora-CTM.
Fuente: propia (2020).

- **Lijado:** a través de este proceso se eliminan las irregularidades de las láminas, o en el caso de lo especificado para el CTM, las irregularidades del tablero alistonado previamente encolado y prensado. Las mismas pueden consistir en exceso de adhesivo o irregularidades como consecuencia del desfase en el proceso de unión. En el CTM, este proceso es llevado a cabo con una lijadora de banda de una cara (Figura 5.37), la cual permite lijar una cara por pasada; para lijar la otra cara, la pieza debe girarse y volverse a pasar. La dimensión máxima de dicha lijadora es de 1,20 m de ancho, razón por la cual, el ancho máximo de los tableros que se fabrican en el CTM no puede superar dicha dimensión.



Figura 5.37. Lijadora de banda-CTM.
Fuente: propia (2020).

- **Almacenamiento y curado:** posteriormente, si el material no es inmediatamente entregado, debe ser correctamente apilado y almacenado en un lugar protegido de la intemperie y con las condiciones apropiadas de HR y T° para su posterior entrega.

Los tableros apilados se dejan en reposo por un tiempo para permitir el fraguado del adhesivo, antes de su puesta en servicio.

Si bien existen otros productos de madera encolada que se utilizan en Argentina, como se mencionó anteriormente, en este capítulo se referenció únicamente al producto más importante de madera encolada factible de realizar, actualmente, en el CTM (tablero alistonado). Cabe destacar, que a través de la correspondiente adaptación tecnológica, se podrían fabricar otros productos tales como molduras, zócalos, machimbres, marcos de aberturas, *siding*, entre otros.

Consideraciones finales

De acuerdo a lo desarrollado a través de este capítulo, para el uso apropiado de una madera aserrada con fines estructurales y no estructurales debe considerarse como punto clave de uso, su contenido de humedad y a partir de ello, aplicar un proceso de secado que se adapte a la condición de uso final. Asimismo, al ser un material biológico, su correcta aplicación estará condicionada también por la presencia de defectos que puedan limitar su capacidad resistente, para ello, existen métodos de clasificación que permiten trabajar con clases apropiadas acorde al uso. Incluso, aplicando un correcto proceso de remanufactura, puede subsanarse la limitación que producen los defectos en la madera, obteniendo, mediante un correcto proceso de clasificación y eliminación de defectos, madera *clear*, que posteriormente puede ser transformada en productos de madera maciza encolada de alto valor agregado.

Referencias

- Atencia, M. (s.f.). Secado de madera. Material didáctico. Buenos Aires, Argentina.
- Bergman, R. (2010). Drying and Control of Moisture Content and Dimensional Changes. En R.J. Ross (Ed.), *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material* (13:1-13:20). Madison, Wisconsin: Centennial Edition.
- Carballo Collar, J.; Hermoso Prieto, E.; Díez Barra, R. (2009). Ensayos no destructivos sobre madera estructural. Una revisión de 30 años en España. *Kurú: Revista Forestal*, 6(17), 16 pp.
- CIRSOC 601. (2016). *Reglamento Argentino de estructuras de Madera*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- CIRSOC. (2016). *Manual de aplicación de los criterios de diseño adoptados por el reglamento CIRSOC 601*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.

- CIRSOC. (2018). *Guía para el proyecto de estructuras de madera con bajo compromiso estructural en base al reglamento CIRSOC 601*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- Esteban Herrero, M. (2003). *Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera* (Tesis doctoral). Recuperada de Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Fank, P.; Stefani, P.; Piter, J. (2017). Clasificación mecánica de tablas de pinos resinosos cultivados en el nordeste de Argentina. *Maderas-Cienc Tecnol*, 19(3), 247-264.
- Fernández Golfín Seco, J.; Conde García, M. (2007). *Manual Técnico de Secado de la Madera*. Madrid, España: AITIM.
- Fernández Golfín Seco, J; Díez Barra, R; Hermoso Prieto, E; Mier Pérez, R. (2003). Madera estructural: estrategias para su clasificación. Boletín de Información Técnica N°223, Madrid, España: INIA-AITIM; CIFOR-INIA
- Galván, J. (2018). Productos técnicos de madera para construcción. En FSC® España-FSC® F000228 (Coord.), *En madera, otra forma de construir-El material constructivo sostenible del siglo XXI* (127-146). Madrid, España: Forest Stewardship Council®.
- García Esteban, L.; Guindeo Casasús, A.; Peraza Oramas, C.; de Palacios de Palacios, P. (2002). *La madera y su tecnología*. Madrid, España: Ed. Mundi Prensa.
- Gottert. (2017). *Secadero. Manual técnico*. Buenos Aires, Argentina.
- Hermoso, E. (2001). *Caracterización mecánica de la madera estructural de Pinus sylvestris L.* (Tesis doctoral). Recuperada de Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Ilic, J.; Northway, R.; Pongracic, S. (2003). Juvenile wood characteristics, effects and identification: literature review. Australia: Forest and Wood Products Research and Development Corporation.
- Íñiguez González, G. (2007). *Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural* (Tesis doctoral). de Universidad Politécnica de Madrid. España.
- Íñiguez González, G.; Arriaga Martitegui, F.; Esteban Herrero, M.; Argüelles Álvarez, R. (2007). Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural. *Revista Informes de la construcción*, 59(506), 97-105.
- IRAM 9532. (1963). *Método de determinación de humedad*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 9662-1. (2015). *Madera laminada encolada estructural: clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 1: Tablas de pino Paraná (Araucaria angustifolia). Zona de cultivo de la especie considerada: Misiones*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 9662-2. (2015). *Madera laminada encolada estructural: clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 2: Tablas de eucalipto grandis (Eucalyptus grandis). Zona de cultivo de*

- la especie considerada: Mesopotamia Argentina*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 9662-3. (2015). *Madera laminada encolada estructural: clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino elliottii y taeda (Pinus elliottii y Pinus taeda)*. Zona de cultivo de las especies consideradas: provincia de Misiones y Corrientes. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 9662-4. (2015). *Madera laminada encolada estructural: clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 4: Tablas de álamo (Populus deltoides 'Australiano 129/60' y 'Stoneville 67')*. Zona de cultivo de las especies consideradas: Delta del Río de La Plata. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 9663. (2013). *Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 9664. (2013). *Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- IRAM 9670. (2002). *Madera estructural: clasificación y requisitos. Clasificación en grados de resistencia para la madera aserrada de pinos resinosos (Pino elliotti y Pino taeda) del noreste argentino mediante una evaluación visual*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- JUNAC. (1989). *Manual del Grupo Andino para el Secado de Maderas*. (1ª Ed.). Lima, Perú: Junta del Acuerdo de Cartagena.
- Kretschmann, D. (2010). Mechanical Properties of Wood. En R.J. Ross (Ed.), *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material*, Capítulo N°5 (5:1-5:46). Madison, Wisconsin: Centennial Edition.
- Kretschmann, D. (2010). Commercial Lumber, Round Timbers, and Ties. En R.J. Ross (Ed.), *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material* Capítulo N°6 (6:1-6:25). Madison, Wisconsin: Centennial Edition.
- Kretschmann, D. (2010). Stress Grades and Design Properties for Lumber, Round timber and Ties. En R.J. Ross (Ed.), *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material* Capítulo N°7 (7:1-7:16). Madison, Wisconsin: Centennial Edition.
- Spavento, E. (2015). *Caracterización y mejora tecnológica de la madera de Populus x euramericana I-214 (Dode) Guinier, austral y boreal, con fines estructurales* (Tesis doctoral). Recuperada de Universidad de Valladolid. España.
- Spavento, E.; Keil, G. (2008). Tipificación. Material didáctico. La Plata, Argentina.
- Stark, N.; Zhiyong, C.; Charles, C. (2010). Wood-Based Composite Materials. En R.J. Ross (Ed.), *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material* (11:1-11:28). Madison, Wisconsin: Centennial Edition.
- Wiedenhoft, A. (2010). Structure and function of wood. En R.J. Ross (Ed.), *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material* (3:1-3:18). Madison, Wisconsin: Centennial Edition.

CAPÍTULO 6

Dendroenergía: biocombustibles sólidos derivados de la madera

Natalia Raffaelli

Consideraciones generales

La gran disponibilidad de recursos biomásicos en la Argentina constituye una alternativa interesante frente al desafío de diversificar la matriz energética nacional, especialmente a partir de fuentes renovables. La sanción de la Ley 27.191 en el año 2015 está en línea con ese objetivo, ya que ha buscado fomentar la participación de las fuentes renovables en la generación de energía eléctrica en el país, otorgando a la biomasa una gran relevancia (Ley 27.191, 2015).

A nivel mundial, alrededor de 2.400 millones de personas utilizan biomasa para sus necesidades de cocción y calefacción (FAO, 2017). Esto demuestra la gran dependencia frente a estos recursos, sobre todo en sus formas menos complejas, tales como la leña y el carbón. Paralelamente, la tecnología destinada a la transformación de la biomasa atraviesa un proceso de gran evolución y desarrollo, con mejoras en su rendimiento energético y su productividad, con la posibilidad de utilizarse en variadas aplicaciones, tanto domésticas, como comerciales e industriales, reemplazando parcial o totalmente a los combustibles fósiles.

Existen reconocidos beneficios a partir de la utilización de la biomasa con fines energéticos, ya que se trata de un recurso renovable, carbono neutral²², menos contaminante que los combustibles fósiles, que promueve la creación de empleo y el desarrollo local, y permite la reducción de residuos, entre otros (Antolin, 2006).

En este contexto, en Argentina, se reconoce que el potencial de aprovechamiento energético de la biomasa es bastante mayor a su actual utilización, y para optimizar esa posibilidad es necesario trabajar sobre el diagnóstico, análisis de situación, estudio de mercados, desarrollo y difusión de las tecnologías de uso y su aplicabilidad (FAO D.T. N°19, 2020). En este sentido, el sector forestal podría desempeñar un rol fundamental.

De acuerdo a ello, el presente capítulo desarrollará, inicialmente, conceptos generales vinculados a la biomasa, sus características y clasificación, para luego focalizar en particular sobre la biomasa foresto-industrial, sus rasgos más sobresalientes y sus posibilidades de aprovechamiento

²² La neutralidad de carbono hace referencia a un balance neto de cero emisiones de gases de efecto invernadero.

desde el punto de vista energético, abarcando los sistemas tecnológicos más utilizados en nuestro país y sus aplicaciones a nivel doméstico, industrial y comercial.

Clasificación de biomasa

Uno de los criterios para clasificar a la biomasa es según su origen de procedencia. Así encontramos:

- **Biomasa natural:** producida de forma espontánea en la naturaleza, sin la intervención del hombre, que presenta una forma, granulometría y contenido de humedad altamente variables. Un ejemplo característico es la biomasa proveniente de las podas naturales de los bosques.

- **Biomasa residual seca:** procede de subproductos sólidos, aparentemente sin utilización, generados a partir de las actividades agrícolas y forestales, en especial de sus industrias transformadoras, como la agroalimentaria y la maderera. Su contenido de humedad usualmente es menor al 60%. Por ejemplo, residuos de biomasa foresto-industrial como madera aserrada (Figuras 6.1 y 6.2), aserrín, viruta; cáscara de nuez, carozo de aceituna (Figura 6.3).



*Figura 6.1. Despunte y eliminación de defectos de tablas aserradas (Corrientes).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2016).*



Figura 6.2. Residuos foresto-industriales de aserradero (Machagai, Chaco).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2015).



Figura 6.3. Residuos agro-industriales leñosos (La Rioja).
Fuente: propia (servicios a terceros realizado a empresa olivícola, 2019).

- **Biomasa residual húmeda:** procede de vertidos biodegradables formados por aguas residuales urbanas e industriales y también de residuos ganaderos. Su contenido de humedad suele superar el 60%. Por ejemplo, guano aviar, estiércol porcino, efluentes cloacales, efluentes industriales, entre otros (Figura 6.4).



Figura 6.4. Planta de tratamiento de efluentes industriales (Buenos Aires).
Fuente: propia (2019).

- **Cultivos energéticos:** se plantan exclusivamente con un fin energético, ya que su única finalidad es producir biomasa transformable en combustible y/o energía. Incluye cereales, oleaginosas, remolacha y cultivos lignocelulósicos, estos últimos también llamados plantaciones energéticas. Por ejemplo, las plantaciones de *Populus* spp. y *Salix* spp., especies de rápido crecimiento, que se prestan muy bien para este tipo de finalidad (Figura 6.5).



Figura 6.5. Madera triturada de ensayos clonales de *Salix* spp., plantación energética-EEJH.
Fuente: propia (2016).

Como se advierte, existen numerosas fuentes de biomasa pasibles de ser aprovechadas en variadas formas. En particular, el presente capítulo abordará con mayor énfasis la biomasa foresto-industrial, ya que constituye una temática afín a los cursos en los que se enmarca este trabajo.

Biomasa foresto-industrial

La actividad foresto-industrial genera un volumen significativo de biomasa residual mayoritariamente seca, factible de ser aprovechada con distintos fines. En Argentina, el rendimiento promedio en establecimientos de primera transformación, como los aserraderos, se estima a grandes rasgos en un 50%, equivalente en la actualidad a unas 2 millones de toneladas al año de residuos foresto-industriales, e incluye materiales en forma de costaneros, puntas, chips, aserrín y virutas (Figuras 6.6 y 6.7). Este conjunto de materiales lignocelulósicos representan un gran potencial biomásico para la producción de energía en nuestro país (MAGyP, 2019).



*Figura 6.6. Pila de chips de madera provenientes del aserrado de trozas-CTM.
Fuente: propia (2020).*



*Figura 6.7. Silo con residuos de carpintería (aserrín y viruta)-CTM.
Fuente: propia (2020).*

Las materias primas mencionadas pueden utilizarse para la producción de biocombustibles, ya sean líquidos, gaseosos o sólidos, o servir de plataforma para elaborar diferentes materiales y/o productos, asociado al concepto de biorrefinería²³. Ello se lleva a cabo a través de una serie de procesos tecnológicos que se desarrollarán más adelante en el presente capítulo. El aprovechamiento de estos recursos renovables posibilitará mejorar la rentabilidad de las actividades forestales, generar nuevos puestos de trabajo (“empleo verde”), diversificar las actividades que fomenten las economías regionales aprovechando su disponibilidad local, contribuir a la mitigación de los impactos ambientales, diversificar la matriz energética, integrar comunidades energéticamente vulnerables, y movilizar inversiones, entre otros beneficios.

Merece la pena establecer una diferencia en cuanto a las características de la biomasa residual de bosques y plantaciones comparados con los residuos foresto-industriales (FAO, 2019).

En general, los residuos provenientes de la cosecha forestal se caracterizan por encontrarse de forma dispersa en el terreno, y ello limita su aprovechamiento como fuente de energía. Su granulometría es muy heterogénea, con piezas de gran tamaño, mezcla de materiales leñosos y herbáceos, alto contenido de humedad, reducida densidad y presencia de elementos contaminantes, lo que dificulta su transporte, manipulación y procesamiento. Es por ello, que para poder aprovechar esta biomasa residual, es necesario efectuar un acondicionamiento que permita su valorización como combustible (Figura 6.8).

²³ Una biorrefinería es una estructura que integra procesos de elaboración de combustibles y productos químicos a partir de biomasa.



*Figura 6.8. Residuos biomásicos post-cosecha en plantación de Pinus spp. (Misiones).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2016).*

Por el contrario, los residuos foresto-industriales están tipificados, se encuentran concentrados dentro de la industria, en sitios con accesos habilitados, con una logística montada y con un contenido de humedad, en general, inferior a los residuos obtenidos del bosque (Figuras 6.9 y 6.10). Ello ha permitido que se pueda apuntar a su reutilización, por ejemplo, a través de su incorporación como biocombustible en determinados procesos, y/o generando valor económico como subproductos, participando de una cadena que se encuentra en expansión.



*Figura 6.9. Residuos gruesos de aserradero de Prosopis spp. (Chaco).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2015).*



Figura 6.10. Residuos finos de transformación mecánica de madera de *Eucalyptus* spp. (Entre Ríos).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2019).

Las características y disponibilidad de la biomasa foresto-industrial determinarán sus posibilidades de aprovechamiento. Si bien toda biomasa es potencialmente susceptible de generar energía, para que esto sea factible es necesario que la misma sea técnica y económicamente accesible (Rearte, 2015).

Para considerar su uso energético como biocombustible, la biomasa deberá tener aptitud para ser transportada y almacenada, alimentar dispositivos y ser consumida en ellos para la generación de energía con medios existentes, disponibles y con adecuada eficiencia. Ello requerirá conocer sus propiedades, y que las mismas sean constantes y conocidas, por lo cual, es imprescindible su caracterización. En ocasiones, será necesaria una mayor clasificación granulométrica, una etapa de secado, u otro acondicionamiento. Con el fin de facilitar y reducir costos en el almacenamiento, transporte y alimentación, y aumentar la eficiencia en la combustión y en el aprovechamiento de la energía, generalmente es necesario lograr dos condiciones principales: la fluidización y la densificación energética. La fluidización intenta que el material sólido se comporte como un fluido, facilitando su manipulación y circulación en los equipos industriales, permitiendo la automatización. La densificación energética de la biomasa se deberá realizar ya que naturalmente, estos materiales presentan baja densidad y es necesario elevarla para que otorguen una concentración de energía adecuada y útil, además de disminuir los costos de transporte y facilitar su manejo.

Su pleno entendimiento conduce a transformaciones primarias y en ocasiones al desarrollo y/o modificación de equipos y maquinarias. Los resultados de las propiedades medidas permitirán al comprador seleccionar equipos y diseñar las instalaciones para garantizar la eficacia y eficiencia del proceso de generación energética.

En cuanto a la accesibilidad económica, es menester que el biocombustible tenga un costo por unidad de energía generada menor que otros combustibles, lo que definirá su eficiencia en

el proceso, y orientará el correcto diseño de los equipos. Este concepto además resulta variable, ya que depende no solo de los costos de producción y de la evolución del mercado de los bio-combustibles, sino principalmente de la variación de los precios de la energía, y por lo tanto de los precios de los combustibles fósiles.

Parámetros para caracterizar los residuos forestales

Existe una serie de parámetros mínimos indispensables que se utilizan para caracterizar a los residuos derivados de la actividad maderera, especialmente la foresto-industrial. Entre ellos se pueden mencionar:

- **Contenido de humedad:** la biomasa es un material biodegradable donde el nivel de humedad juega un rol principal. Es un factor determinante a tener en cuenta tanto para su acondicionamiento, su comercialización como así también su procesamiento y la tecnología seleccionada para su aprovechamiento. Asimismo, incide en la eficiencia de la producción energética. Su estimación generalmente se realiza en estufa a $\pm 105^{\circ}\text{C}$ (Figura 6.11).



Figura 6.11. Determinación de contenido de humedad de aserrín y despuntes en estufa-LIMAD.
Fuente: propia (2019).

- **Granulometría:** las dimensiones de los distintos biocombustibles condicionan su manipulación y definen la posibilidad de su transporte, es decir, afectan el volumen estéreo²⁴ de los materiales. Paralelamente, ello se asocia a la posibilidad de fluidización de los mismos. Asimismo, determinan la superficie específica del biocombustible y eso también impacta en la modalidad de aprovechamiento energético.

- **Densidad:** este parámetro es variable según las especies y el tipo de madera. En general, aquella especie con mayor densidad generará un biocombustible con mayor poder calorífico (se asume que a mayor densidad del material, mayor densidad energética).

- **Poder calorífico (PC):** es la cantidad de energía por unidad de masa que desprende un combustible cuando se quema, y generalmente se expresa en kcal/kg o en MJ/kg. Suele diferenciarse el poder calorífico superior (PCS), que abarca el calor total desprendido de la combustión completa de una masa de combustible, incluyendo el calor generado por la condensación del vapor de agua presente en el material; y el poder calorífico inferior (PCI), que solo contabiliza el calor de oxidación del combustible, sin considerar el contenido de humedad que hubiera en el mismo.

- **Contenido de cenizas:** comprende el residuo sólido mineral que persiste tras una combustión total de la madera. Esta fracción puede provenir tanto de la composición natural del material, como de impurezas que pueda acarrear la madera durante su procesamiento. En general, el contenido de ceniza en la madera no es elevado (valores menores al 3-4%), pero su presencia puede determinar su aptitud para integrar determinados circuitos tecnológicos (Figura 6.12).



Figura 6.12. Determinación de contenido de cenizas en madera-LIMAD.
Fuente: propia (2019).

- **Contenido de elementos químicos:** el contenido de ciertos elementos químicos como el cloro, azufre y nitrógeno, pueden originar gases contaminantes durante la combustión, como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos órgano-clorados, y modificar la composición

²⁴ El volumen estéreo es el volumen de madera sólida apilada que estaría contenida en un cubo de 1 m de lado. Así, el volumen estéreo contiene volumen sólido y aire en proporciones variables.

química de las cenizas generadas. Sin embargo, cabe aclarar que estos elementos se presentan en mínimas concentraciones en la mayoría de las maderas.

Tipos de biocombustibles sólidos derivados de la madera

El término **dendroenergía** se refiere a la energía producida por la combustión de leña, chips leñosos, carbón vegetal, pellets, briquetas, y cualquier otro material derivado de la madera, ya sea en estado sólido, líquido o gaseoso.

A continuación, se caracterizan los principales tipos de biocombustibles sólidos derivados de la madera.

Leña

Está constituida por madera generalmente trozada, proveniente de troncos o ramas, que se destina para hacer fuego. Es un material altamente higroscópico, y al momento de su corte puede tener un contenido de humedad elevado (mayor al 30-40%). La madera destinada a su utilización como leña normalmente atraviesa un periodo de estacionamiento que permite un oreado o secado al aire, hasta alcanzar un contenido de humedad en equilibrio con el ambiente circundante.

La leña ha sido el biocombustible más empleado por la humanidad a lo largo de la historia. Como en varios países en vías de desarrollo, su uso como fuente de energía para satisfacer necesidades de cocción y calefacción es hoy una alternativa muy presente en nuestro país, ya que se trata de un recurso que puede obtenerse y procesarse localmente, con relativa facilidad y bajo costo, sobre todo en zonas rurales (Figura 6.13). Si bien su utilización no requiere grandes destrezas ni equipamiento sofisticado, puede presentar ciertas desventajas tales como requerir un volumen significativo de almacenamiento previo, producir gran cantidad de humo que dificulta su utilización en ambientes cerrados, generar residuos sólidos (cenizas) que deben ser luego tratados, precisar alimentación continua de los artefactos para cocinar o calefaccionar, presentar dificultades de disponibilidad en centros urbanos, etc. (FAO, 2008).



Figura 6.13. Extracción de leña del monte nativo: entresaca y apilado de *Aspidosperma quebracho-blanco* y *Schinopsis balansae* (Santiago del Estero).

Fuente: propia (viaje de perfeccionamiento profesional para graduados, 2013).

Según datos del Anuario de Estadística Forestal, Especies Nativas 2016 (MAyDS, 2018), la extracción anual de madera para uso final como leña ronda aproximadamente el millón de toneladas a nivel nacional, y aquella leña destinada para carbón alcanza alrededor de dos millones de toneladas en total. Las provincias argentinas que han registrado el mayor uso de leña con estos fines se encuentran en el norte de nuestro país, en especial Chaco, Formosa, Salta, Santiago del Estero, Misiones y Corrientes, aunque debe recordarse que se trata de datos muy difíciles de sistematizar por el alto grado de informalidad de la actividad y la gran atomización de las comunidades que recurren a la leña como principal combustible.

La forma y tamaño de la leña, el porcentaje de corteza y su contenido de humedad son algunas de las variables físicas principales que influyen en su combustión (Figura 6.14). En general, posee forma cilindro-cónica, y la homogeneidad de los trozos influye en el peso del volumen estéreo, en el coeficiente de apilado y en la superficie específica, que servirá de contacto entre comburente y combustible (Camps & Marcos, 2002).



Figura 6.14. Apilado de leña de *Populus* spp. en un pequeño aserradero local (Berisso, Buenos Aires).
Fuente: propia (trabajo integrador de carrera de Ing. Ftal., 2019).

Chips de madera

Son pequeños pedazos de madera de forma plana, donde predomina el largo y el ancho sobre el espesor, provenientes del seccionamiento mecánico de la biomasa en partículas de dimensiones relativamente homogéneas, utilizando una herramienta filosa o cuchilla que realiza un corte limpio sobre el material, eliminando bordes fibrosos. Los chips de madera, en ocasiones llamados también astillas, presentan una longitud de 3 a 10 cm, un ancho de 2 a 6 cm, y un espesor generalmente menor a 2 cm (Figura 6.15).



Figura 6.15. Chips de madera de *Pinus spp.*
Fuente: propia (2016).

Pueden aprovecharse para este fin los subproductos de la industria maderera producidos por los aserraderos, carpinterías, fábricas de muebles, plantas de segunda transformación (elaboración de vigas, tableros, terciados, pisos), etc. Generalmente, son de bajo costo, pueden transportarse y almacenarse con mayor facilidad que la leña, y permiten ser dosificados de manera automática (Uasuf & Hilbert, 2012). Cabe destacar que el chipeado puede reducir de 5 a 7 veces el volumen del material a transportar, y tiene mayor aptitud para comercializarse. Uno de los usos principales de los chips de madera, además de su empleo en la fabricación de tableros y en la industria celulósica, apunta a la generación de energía térmica y eléctrica. El uso dendroenergético requiere una clasificación de calidad de los chips, para poder utilizarlos en determinados equipos (por ejemplo, calderas) de la manera más apropiada. Ello redundará en procesos de combustión más eficientes, en la prevención de fallas, deterioros o desgaste, y en la minimización de los costos operativos.

Pellets y Briquetas

Los pellets y briquetas de madera son biocombustibles derivados de un proceso de densificación. A partir del pasaje de los residuos lignocelulósicos de determinada granulometría (aserrín o molido) por una máquina de extrusión, se produce la autoaglomeración del material leñoso, afectada por la combinación de alta presión y elevada temperatura. El material se introduce en un extrusionador a tornillo o pistón, que lo comprime, a la vez que lo hace pasar por una boquilla agujereada o troquel, fusionándose en una masa sólida en forma de cilindro. Según salen por

los troqueles, una cuchilla corta los cilindros al tamaño deseado. Esto provoca un aumento de temperatura con consecuencias sobre los componentes químicos de la madera, produciéndose la fundición de la lignina que posibilita la adhesión del resto de los materiales.

Tanto los pellets como las briquetas conllevan un proceso común de fabricación que implica una compactación, con la diferencia en su tamaño final, la posibilidad de automatización de la tecnología seleccionada y su finalidad. Una línea de flujo estándar de producción de pellets y briquetas puede observarse en la Figura 6.16.

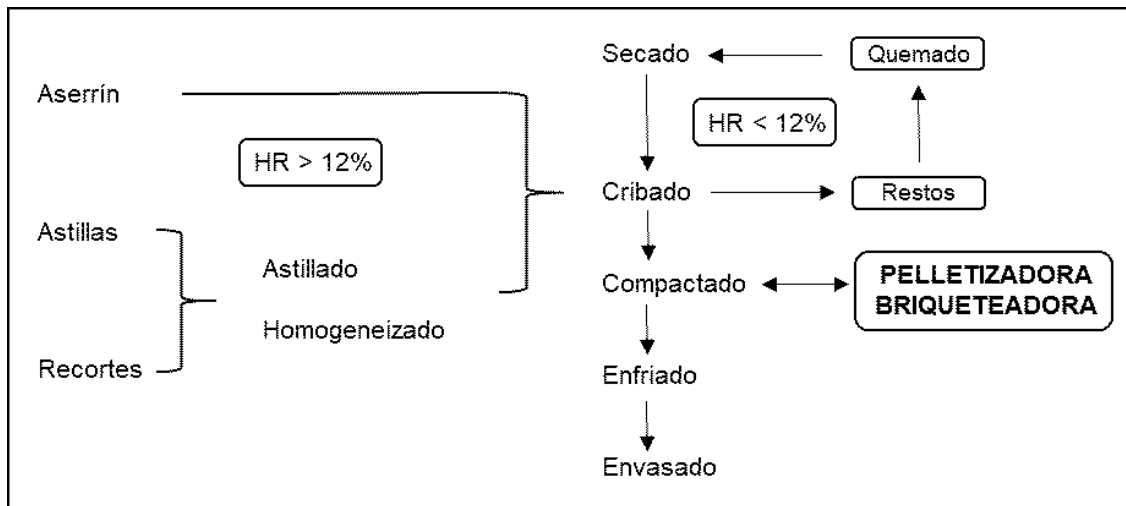


Figura 6.16. Línea de flujo para obtención de pellets y briquetas.

Fuente: adaptada de Camps & Marcos, 2002.

Los pellets (Figura 6.17) son productos estandarizados, cilíndricos, y de gran durabilidad. Son más densos que el material de origen (por ejemplo, un pellet de *Pinus elliottii* presenta una densidad de 1,1 a 1,2 g/cm³ cuando dicha madera normalmente posee una densidad de 0,50 a 0,55 g/cm³), y su tamaño normalmente oscila de 6 a 10 mm de diámetro, y de 10 a 40 mm de longitud. Poseen bajo contenido de humedad (menor al 10%) y bajo contenido de cenizas (generalmente, inferior al 1%). Al ser materiales producidos y comercializados bajo normativa, sus propiedades físico-químicas son relativamente constantes. Por su reducido tamaño y su forma cilíndrica, son fáciles de manipular, y permiten ser dosificados a través de sistemas mecánicos o neumáticos, ya que tienden a comportarse como un fluido. Suelen ser vendidos embolsados (por ejemplo, en sacos de 15 kg), o a granel (en bolsas *big bag* de hasta 1.000 kg).



*Figura 6.17. Pellets de aserrín de Pinus spp (Misiones).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2016).*

Las briquetas (Figura 6.18) se asemejan a los pellets en varias de sus características (humedad, contenido de cenizas, densidad), siendo su principal diferencia su mayor tamaño y su destino de utilización. Las briquetas pueden tener forma cilíndrica o presentar sección prismática (cuadrangular, hexaédrica, octogonal, etc.), y sus dimensiones oscilan entre 5 y 15 cm de diámetro o sección, y entre 40 y 80 cm de longitud. Este mayor tamaño condiciona su utilización, ya que al no comportarse como un fluido presenta complicaciones para integrar un circuito automatizado, y por ello son principalmente empleadas en el sector doméstico.



*Figura 6.18. Briquetas de madera.
Fuente: propia (2016).*

Una característica importante de estos biocombustibles es su friabilidad, que indica la resistencia al golpeo sin desmenuzarse. Esto puede ocurrir durante el movimiento, al ser manipulados, o cuando impactan sobre una superficie (suelo, estufa). Además de la friabilidad en movimiento, se suele evaluar la friabilidad en combustión, medida como el tiempo que transcurre desde que un pellet o briqueta se desmenuza una vez encendido.

Industrialmente, el proceso de pelletización consiste en la compactación del material lignocelulósico, tal como se describió anteriormente; en esta ocasión, una prensa cilíndrica actúa, por extrusión, avanzando sobre el mismo. El émbolo de la prensa empuja el material, de granulometría y contenido de humedad específicos, sobre una matriz normalmente cilíndrica (anular) con orificios circulares, finalizando con la formación del pellet, que debe someterse a un enfriamiento antes de su envasado (Nojek, 2009). Usualmente, no se utilizan aditivos, porque el aumento de la temperatura durante el proceso es suficiente para provocar la fusión de la lignina, la cual actúa como aglutinante natural del material. Asimismo, la inclusión de aditivos podría encarecer el proceso y resultar contaminante al momento de la combustión (Figuras 6.19 y 6.20).



*Figura 6.19. Planta pelletizadora (Presidencia de La Plaza, Chaco).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2015).*



Figura 6.20. Matriz anular perforada de máquina pelletizadora (Presidencia de La Plaza, Chaco).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2015).

En el caso de las briqueteadoras, estas máquinas compactan biomasa finamente dividida y homogeneizada, ayudadas por el empuje de un pistón accionado por un motor, y se van cortando según la longitud deseada. Cabe mencionar que la fabricación de briquetas también puede ser realizada en forma manual, con un equipamiento más rudimentario, elaborando un producto de menor calidad, que asimismo puede ser utilizado en aplicaciones domésticas.

Carbón vegetal

Es el residuo sólido del proceso de pirólisis, el cual consiste en una descomposición termoquímica de la madera bajo condiciones controladas, en un ambiente cerrado. Durante dicho proceso, se administra la entrada del aire para evitar una combustión completa y que la madera acabe en cenizas. El carbón de leña se utiliza principalmente como combustible doméstico, para cocción y calefacción, sobre todo en países en desarrollo, pero también es importante a nivel industrial en áreas como la siderurgia, y puede servir como materia prima para la elaboración de carbón activado, un material de significativa utilidad en la industria farmacéutica, química, alimenticia, y para el tratamiento de efluentes y aguas residuales (FAO, 1983).

El carbón vegetal es un material inerte, con alta superficie específica, enriquecido en carbono, de estructura poco cristalina (a diferencia del grafito y el diamante), y de baja higroscopicidad (su contenido de humedad en equilibrio con el ambiente suele ubicarse por debajo del 10%). Su

poder calorífico es significativamente superior al de la madera (en promedio, 7.500 kcal/kg versus 4.200 kcal/kg, respectivamente). Su forma es variada, ya que depende del troceado original de la leña, pero suele partirse en prismas de tipo cúbicos cuando se someten a fuerzas disruptivas. Su color es negro y presenta cierto brillo debido a los líquidos piroleñosos que se depositan en sus caras (Figura 6.21). Suele clasificarse mediante una homogeneización a través de cribas o tamices, que separan las distintas fracciones granulométricas. Su densidad aparente es baja, oscila entre 0,2 y 0,5 g/cm³, dependiendo de la madera de origen, y debido a la gran cantidad de poros que posee, presenta una superficie por unidad de volumen muy elevada (160-450 m²/g) (Camps & Marcos, 2002).



Figura 6.21. Carbón vegetal elaborado en horno-CTM.

Fuente: propia (2017).

La producción y utilización de carbón en nuestro país es una práctica muy difundida, especialmente en las regiones del norte argentino, sobre todo a partir de maderas del bosque nativo. La actividad la desarrollan desde pequeños pobladores rurales, que encuentran en la carbonización un complemento para su economía de subsistencia, hasta grandes productores que apuntan a cubrir no solo el mercado nacional sino también el internacional (exportación a Europa, principalmente) (Kees *et al.*, 2017).

Normalización del mercado de biocombustibles sólidos en Argentina

En Argentina, desde el año 2018, a partir de un esfuerzo conjunto entre el Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM), el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) y referentes del ámbito académico, científico e industrial, se viene trabajando sobre normas

específicas acerca de biocombustibles sólidos que permitan dar un marco legal a la actividad, necesario para el incentivo de su uso, tanto residencial, comercial como industrial. La Norma IRAM-ISO 17225 (2019), en sus diferentes partes, apunta a clasificar las diversas biomásas que se encuentran en Argentina, destinadas a la generación de energía renovable, ya sea térmica o eléctrica. Incluye las definiciones de variados tipos de biocombustibles, desde los más simples como la leña y los chips de madera, hasta los más desarrollados tecnológicamente, como el pellet de madera y las briquetas en formatos comerciales, haciendo un especial enfoque en la materia prima y su correcta certificación, para ayudar a desarrollar el sector y dar confiabilidad a los usuarios, tantos industriales como hogareños mediante una mayor regularización.

La Norma IRAM-ISO 17225, *Biocombustibles sólidos. Especificaciones y Clases de combustibles*, ha sido dividida en varias partes para su mejor organización, las cuales ya se encuentran publicadas y disponibles para su utilización.

Parte 1: Requisitos generales (2019).

Parte 2: Clases de pellets de madera (2020).

Parte 3: Clases de briquetas de madera (2020).

Parte 4: Clases de chips de madera (2020).

Parte 5: Clases de leña de madera (2020).

Parte 6: Clases de pellets de origen no leñoso (2020).

Parte 7: Clases de briquetas de origen no leñoso (2020).

Tal como lo señala en su texto la parte 1 de la norma, su objetivo es

(...) proporcionar principios claros e inequívocos de clasificación para los biocombustibles sólidos, que sirva como una herramienta para permitir el comercio eficiente de los biocombustibles y el buen entendimiento entre vendedor y comprador, así como una herramienta para la comunicación con los fabricantes de equipos. También va a facilitar los procedimientos de autorización administrativa y la presentación de informes (IRAM-ISO 17225-1, 2019, p.7).

Además de abarcar el estudio de los biocombustibles sólidos, el Comité responsable de esta tarea pretende avanzar con la normativa para la verificación técnica de los equipos de combustión que trabajarán con estos nuevos materiales y con aquellos que ya lo hacen a partir de biomasa como fuente de energía.

Tecnologías de aprovechamiento de los biocombustibles sólidos: transformaciones termoquímicas principales

Existen distintas tecnologías de aprovechamiento de los residuos foresto-industriales, utilizando diversos tipos de biocombustibles déndricos (algunos de ellos, ya descriptos precedentemente). En

este capítulo, se focalizará en algunas de ellas, principalmente de naturaleza termoquímica, orientadas a las posibilidades concretas de aplicación en nuestro país.

Combustión

La combustión es un método termoquímico en el cual la madera o sus derivados son oxidados por completo, formando CO_2 y vapor de agua, y liberando calor. En este caso, el combustible (madera) en presencia de un comburente en exceso (aire) reacciona ante la aplicación de una energía de activación (chispa), produciendo energía térmica, que puede ser utilizada tanto para fines domésticos (cocción o calefacción) como comerciales o industriales (procesos de secado, generación de energía mecánica, eléctrica, etc).

Como se mencionó previamente, el material disponible para ser utilizado a fin de producir energía mediante la combustión puede presentarse en distintas formas tales como leña, astillas o chips, materiales densificados y/o carbón vegetal.

A nivel residencial, los dispositivos para generar energía por combustión son variados. Abarcan desde cocinas a leña y/o carbón, braseros, hornos de barro o ladrillos de distinta escala, hasta estufas hogares, salamandras, estufas rockets, estufas a base de pellets o briquetas, entre otros.

Industrialmente, los procesos se llevan a cabo en equipos denominados **calderas**. La caldera es un dispositivo diseñado para generar vapor, normalmente de agua (Figura 6.22). El vapor se produce a partir de una transferencia de calor a un fluido en estado líquido, que al calentarse cambia de fase. De esta manera, el potencial energético del combustible se convierte en energía térmica, que posteriormente se transmite a un medio en el que pueda ser útil (FAO D.T. N°21, 2020).



Figura 6.22. Caldera de biomasa alimentada con residuos foresto-industriales (Entre Ríos).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal, 2019).

Los elementos básicos de una caldera industrial son el horno u hogar, y el quemador. En ella se asegura la mezcla íntima del combustible y el comburente, la admisión de cantidades suficientes de aire para quemar por completo la biomasa, una temperatura apropiada para encender

la mezcla, y un tiempo de residencia adecuado para que la combustión sea completa. El quemador incinera el material para generar una llama, la cual transmite el calor producido a un circuito de agua que puede ser usado para los procesos industriales que lo requieran, incluyendo calefacción, agua sanitaria, etc. Normalmente, se trabaja con exceso de oxígeno, y se alcanzan temperaturas que varían entre 800 y 1.100°C.

A continuación se presenta la estructura general de una caldera alimentada a biomasa, donde se identifican las secciones correspondientes al ingreso del biocombustible, el control de la regulación del aire, la zona de generación de calor y su transferencia al circuito de agua (Figura 6.23).

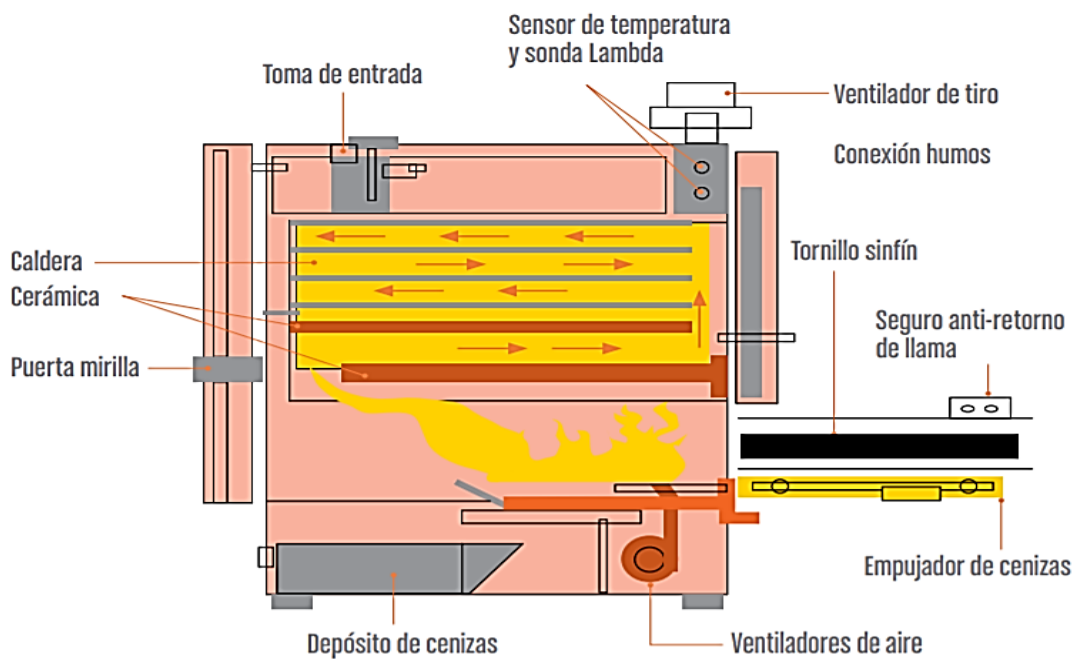


Figura 6.23. Estructura de una caldera de biomasa.
Fuente: Hildebrandt Gruppe (extraída de FAO DT N°21, 2020).

Existen algunos factores que afectan al proceso, entre ellos:

- Grado de humedad de la biomasa. Idealmente, la biomasa leñosa debe presentar un contenido de humedad inferior al 15%, para optimizar los rendimientos.
- Granulometría y densidad. Cada equipo indica las características deseadas del combustible, las cuales influyen sobre el proceso.
- Contenido de azufre. En el caso de la madera, es mínimo, por lo cual las emisiones gaseosas de óxidos de azufre no son significativas.
- Poder calorífico del combustible. Dependerá del tipo de biocombustible, los cuales aportarán distintos niveles de densidad energética.

En la combustión directa se desprenden gases procedentes de la propia combustión, que deben ser asimismo quemados mediante la introducción de aire secundario para disminuir las emisiones a la atmósfera; además se generan escorias o cenizas como consecuencia del contenido mineral de la biomasa y las impurezas del residuo, sumado a la energía producida. Esta

última puede ser empleada en diversas aplicaciones, como la generación de vapor, la cogeneración (vapor + electricidad), su utilización en hornos industriales, etc.

En el mercado, se encuentran distintos modelos de calderas. Entre los más difundidos, están aquellos donde el horno cuenta con una cámara revestida por material refractario que contiene en su interior una parrilla, combinada con una cámara de combustión que permite la quema de gases, trabajando a temperaturas de 1.000°C. Además de la tecnología con parrilla, se encuentran calderas de lecho fluidizado, pudiéndose utilizar tanto en plantas térmicas como termoeléctricas alimentadas con biomasa. Trabajan a menor temperatura, aproximadamente 800°C, y eso disminuye el nivel de emisiones de óxidos de nitrógeno y la formación de escorias. Son más eficientes que los modelos de parrilla y admiten mayor variabilidad en cuanto al contenido de humedad y granulometría.

La combustión de biomasa presenta algunos beneficios frente al empleo de combustibles fósiles:

- Disminución de las emisiones de azufre y nitrógeno.
- Disminución de las emisiones particuladas.
- Disminución de las emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos.
- Disminución de las emisiones de CO₂, desacelerando el efecto invernadero.
- Aprovechamiento de residuos agrícolas y/o forestales sin otro destino.
- Posibilidad de utilización de tierras abandonadas o desertizadas con cultivos energéticos.
- Independencia energética.
- Mejora socioeconómica de las áreas rurales y fomento de “empleos verdes”.

En nuestro país, se vienen desarrollando proyectos que apuntan a la reutilización de la biomasa leñosa residual proveniente de la actividad forestal, empleándola como biocombustible para alimentar calderas industriales instaladas en centrales térmicas, para la generación de energía eléctrica. Tal es el caso de variados emprendimientos desarrollados en nuestro territorio, entre los que se destacan los de la región del noreste argentino. Uno de los proyectos más significativos se ubica en la localidad de Virasoro, provincia de Corrientes (Figura 6.24), donde se ha construido la central térmica a base de biomasa más grande e importante de Argentina, con capacidad de producir 40 MW de energía limpia a partir de residuos de *Pinus* spp. y *Eucalyptus* spp. de plantaciones locales, que será inyectada a la red eléctrica del sistema interconectado nacional.



Figura 6.24. Planta de producción de energía eléctrica a base de biomasa (Virasoro, Corrientes).
Fuente: FRESA (2020)²⁵.

Pirólisis

La carbonización de la madera consiste en la transformación del material leñoso en carbón, bajo la sola influencia de la temperatura controlando la entrada del aire, descomposición térmica llamada pirólisis.

Durante la pirólisis, que exige prácticamente la ausencia de oxígeno, la madera atraviesa distintas etapas, que van modificando la estructura y composición química del material inicial, para dar finalmente paso a los productos resultantes; los mismos pueden presentarse en estado sólido, líquido y gaseoso, en diversas proporciones según las condiciones en las que se lleva a cabo el proceso. Mientras la fase sólida obtenida se denomina carbón, los gases volátiles expulsados pueden condensarse generando un biocombustible líquido llamado *bio-oil*, además de liberarse gases no condensables. Generalmente, los rendimientos de carbonización en métodos discontinuos oscilan entre 20% y 30% de residuo sólido en función del peso seco de la madera.

Normalmente, si la pirólisis se conduce muy lentamente con tiempos de reacción que llevan días, se optimiza la producción del producto sólido, en este caso, el carbón. Por el contrario, si la reacción ocurre en tiempos muy breves (segundos, minutos), con temperaturas que no superan los 650°C y enfriamientos rápidos, se favorece el rendimiento de líquidos (*bio-oil*). Finalmente, con temperaturas superiores y tiempos de residencia altos, se favorece la producción de gases (Marcos Martín, 1989).

En cuanto a las etapas que atraviesa la madera durante el proceso de carbonización, llevado a cabo en dispositivos denominados hornos, se identifican distintos estadios que se describen a continuación.

²⁵ <https://www.fresa.com.ar/planta>

En una primera fase, la madera sufre una deshidratación, que dependerá de su contenido de humedad inicial. Esto ocurre una vez superados los 100°C en el horno y progresa a la par que aumenta la temperatura. La eficiencia mejorará si se efectúa un pre-secado y/o se trabaja con madera estacionada previamente. Esta primera etapa avanza hasta que la temperatura del horno alcanza alrededor de 250-280°C. La energía necesaria proviene de la combustión parcial de parte de la madera cargada en el horno, y es una reacción endotérmica. El producto resultante hasta ese momento se denomina **madera torrificada** y se verifica una impactante cantidad de humos, predominantemente de color blanco espeso, en línea con la producción de vapor de agua. Luego, si la temperatura continúa ascendiendo hasta los 350°C, la madera comienza espontáneamente a fraccionarse, produciendo carbón junto con vapor de agua, ácido acético, metanol, acetona, entre otros, y el color del humo vira hacia el amarillo. A mayores temperaturas (rango de 400-500°C) se liberan compuestos químicos más complejos, como alquitranes, y gases no condensables (hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono). En esta etapa la reacción libera energía, es decir, es exotérmica. Visualmente, se verifica la producción de humos de colores azulinos, menos densos, que evolucionan hasta volverse transparentes. En esa instancia, queda sólo el residuo sólido carbonizado, llamado carbón vegetal, enriquecido en carbono fijo en niveles que pueden alcanzar un 70-80%.

Resulta interesante verificar el efecto de la temperatura sobre el rendimiento y composición del carbón vegetal remanente, como se demuestra en la siguiente curva (Figura 6.25). Entre los 500 y 600°C se suele verificar el equilibrio deseado entre la calidad del carbón resultante y el rendimiento económicamente aceptable de la actividad, punto donde se interrumpe la entrada de aire al horno para finalizar la reacción.

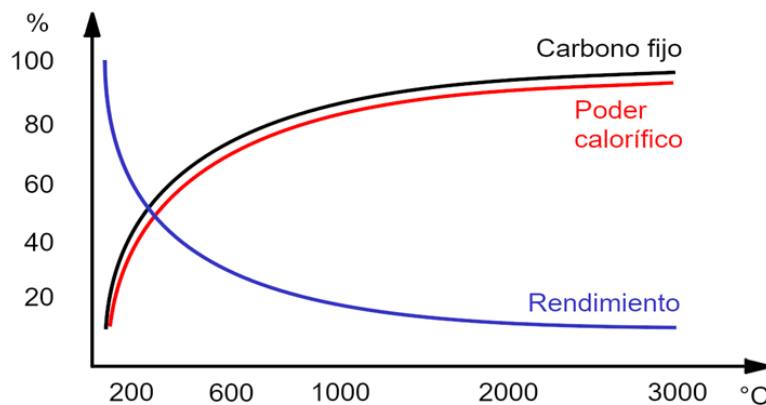


Figura 6.25. Curvas de rendimiento y calidad energética durante una carbonización típica.
Fuente: propia (2020).

El carbón vegetal tiene diversas aplicaciones, ya sea como combustible o como insumo industrial. En Argentina, el proceso emplea principalmente maderas de latifoliadas, provenientes en su gran mayoría de bosques nativos. Entre los usos domésticos del carbón vegetal están las aplicaciones gastronómicas (cocción) y de calefacción, mientras que el uso industrial se ve en actividades tales como el secado de otros productos (secaderos de madera, de té, de yerba mate, etc.), en la industria cementera y en la siderúrgica, entre otros. Vinculado a esta última

actividad, nuestro país ha tenido históricamente una de las mayores producciones de carbón vegetal de alta calidad para su uso exclusivo en la industria siderúrgica instalada en la provincia de Jujuy, hoy discontinuada.

El conocimiento de la técnica de carbonización permite elaborar un material de mayor poder calorífico que la leña, biocombustible muy difundido en varias comunidades rurales y semi-rurales de nuestro país. Se realiza a través de métodos de relativamente bajo costo, adaptables según las posibilidades de cada usuario, ya sea para destino propio (gastronomía o calefacción), y/o para proporcionar un producto factible de generar un ingreso monetario que complemente la economía familiar.

Existen diversos tipos de hornos de carbonización, que conllevan variados grados de complejidad, inversión y tecnología. Se pueden clasificar en base a la barrera de separación entre la madera y el exterior (por ejemplo, tierra, ladrillos, cemento, acero, etc.); en función del calor empleado para secar y calentar la leña (autoencendido de la propia madera u otra fuente); o según si el proceso se realiza en forma continua o discontinua (*batch*).

Los métodos más sencillos son los **artesanales**, que precisan sólo de herramientas como hachas, machetes, rastrillos y palas, requiriendo tiempos para obtener el carbón vegetal superiores a un mes, según las condiciones climáticas y la experiencia del operador. En estos casos, la barrera física es la tierra, o una combinación de tierra y paja. Entre los de tipo artesanal encontramos la “**parva**” y la “**fosa**” (Figuras 6.26 y 6.27). La **parva** se construye desde el nivel del suelo, debidamente asentado, hacia arriba, colocando las trozas más grandes en la base, cruzadas entre sí, y apoyando sobre ellas el resto de la madera a carbonizar en forma de pila cónica. En su centro, se deja una chimenea por la cual se inicia el encendido y luego la estructura se aísla con tierra y paja. La **fosa** requiere excavar el suelo y dentro de ese espacio introducir la madera a carbonizar, para luego aislarla tapándola con tierra, y/o, en ocasiones, con una tapa de chapa. En ambos métodos, si bien la calidad del carbón obtenido resulta irregular (aunque mejor en la parva que en la fosa), la habilidad del carbonero es fundamental.



Figura 6.26. Parva tradicional.
Fuente: Hermoso de Mendoza (2021)²⁶.

²⁶ <https://www.sasua.net/estella/articulo.asp?f=carboneros&n=Carboneros>



Figura 6.27. Fosa de carbonización con tapa.
Fuente: Canul Tun (2013).

La producción en Argentina se realiza predominantemente en **hornos semi-industriales**, tales como el horno de ladrillo y barro, conocido como “**media naranja argentino**” (Figuras 6.28 y 6.29). Son frecuentemente vistos en explotaciones del norte argentino, especialmente en las provincias de Santiago del Estero, Chaco y Formosa, a partir de maderas como *Aspidosperma quebracho-blanco* (quebracho blanco), *Schinopsis balansae* (quebracho colorado chaqueño) y *Prosopis* spp. (algarrobos). Son hornos fijos, que admiten un alto volumen de madera y suelen instalarse en predios cercanos a los bosques nativos que abastecen estos equipos. Las explotaciones comerciales, destinadas a la venta nacional y/o internacional de carbón, se realizan a una escala considerable, empleando una serie de hornos alineados, que normalmente miden entre cinco y ocho metros de diámetro, y pueden albergar un volumen bruto que supera los cien metros cúbicos. El ciclo completo, que incluye el tiempo de carga, carbonización, enfriado y descarga, puede abarcar entre seis y diez días, dependiendo de cuestiones climáticas, rendimiento seleccionado, y destreza del operador.



Figura 6.28. Serie de hornos de ladrillo “media naranja argentino” (Chaco).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2015).



Figura 6.29. Hornos de ladrillo “media naranja argentino” en producción (Santiago del Estero).
Fuente: propia (viaje de perfeccionamiento profesional para graduados, 2013).

Una alternativa tecnológica de manufactura nacional son los hornos cilíndricos de acero, conocidos como “**hornos TPI**” (por las siglas en inglés de su desarrollador, *Tropical Products Institute*), aptos para la producción de carbón vegetal a partir de madera de bosques o desechos de aserradero. El CTM cuenta con un horno de estas características, emplazado en la Estación Experimental de Los Hornos (Figura 6.30). La unidad está constituida por dos cilindros de chapa de acero inoxidable, encastrables, de 2,3 metros de diámetro por 0,90 metros de altura, finalizando en una tapa cónica con 4 boquillas para escape de humos; posee adicionalmente 8

canales inferiores (humeras) sobre los que se montan alternadamente 4 chimeneas que permiten la entrada y salida controlada del aire. Cuenta con una capacidad de 6 a 7 m³ de madera (≈3.000 kg) y un rendimiento aproximado del 20-25%, alcanzando una temperatura en el interior del horno de 500 a 600°C.



*Figura 6.30. Horno TPI en funcionamiento-CTM.
Fuente: propia (2018).*

Respecto al proceso productivo, la carbonización en horno cilíndrico metálico TPI atraviesa una serie de etapas, descritas brevemente a continuación (Raffaeli, 2016):

- Armado y ensamblado del horno: el primer anillo del horno se monta sobre las 8 humeras dispuestas radialmente en el suelo, que debe estar limpio y apisonado.

- Carga del material leñoso y cierre mediante colocación de la tapa y chimeneas: se carga la madera generalmente en disposición radial desde el suelo hasta el nivel del primer anillo, y luego se monta el segundo cilindro para continuar la carga hasta completar la altura de la unidad. Se termina colocando la tapa cónica dejando destapadas inicialmente las boquillas superiores para permitir el escape de los humos preliminares (Figura 6.31).

- Encendido desde la base del equipo y puesta en marcha: se prende con la ayuda de pequeñas ramas secas introducidas por debajo del anillo inferior, comenzando por la zona opuesta a la dirección principal de los vientos predominantes, y luego se continúa de forma circular alrededor de la base. Una vez encendido en su totalidad, se cierran las boquillas superiores de la sección cónica colocando las tapas provistas.

- Monitoreo y alternancia de chimeneas para facilitar la circulación pareja del aire dentro del horno: se verifica la progresión de los humos a lo largo del proceso, controlando su caudal y coloración. Las 4 chimeneas móviles van rotando su posición en la base del horno cada 8 a 10 horas, de manera de permitir la correcta y pareja circulación de aire dentro del equipo.

- Enfriado y apertura del horno: para abrir el horno, se debe verificar el completo enfriamiento de la unidad, a fin de evitar posibles incendios espontáneos provocados por la entrada abrupta del aire si aún persisten focos encendidos (Figura 6.32).

- Descarga y embolsado del material: el horno se desarma y se procede al acopio del carbón en bolsas resistentes.



*Figura 6.31. Montaje, carga y cierre del horno TPI-CTM.
Fuente: propia (2018).*



*Figura 6.32. Carbonización finalizada en horno TPI-CTM.
Fuente: propia (2016).*

Normalmente, la duración del proceso abarca de 4 a 6 días, dependiendo de la marcha de la carbonización, nivel de vientos de la zona, condiciones climáticas, experiencia del operario, etc. El horno metálico transportable suele necesitar un escaso mantenimiento, tales como su guardado bajo techo mientras no está en uso para prevenir la corrosión oxidativa y evitar el riesgo de

deformación a fin de asegurar el correcto encastre entre anillos por más tiempo; su vida útil alcanza unos diez años utilizándolo en forma regular.

Finalmente, existen **hornos de tecnología industrial**, de funcionamiento continuo y alimentación automática, de alto rendimiento, asentados en grandes instalaciones fijas, que pueden trabajar con leña o astillas de grandes dimensiones, y que producen carbones de alta uniformidad, excelente calidad y elevados porcentajes de carbono fijo (superiores al 80%). Tal es el caso del “**horno Lambiotte**”, de origen francés. Una de sus grandes ventajas es que es posible recuperar los líquidos piroleñosos a partir de los volátiles condensables, y los gases pueden ser re-quemados para mantener la temperatura de carbonización, que en este tipo de horno es superior a la del horno media naranja argentino o el TPI. Cabe aclarar que en Argentina este tipo de horno no está disponible.

Gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico por el cual la biomasa es transformada en un gas combustible, a altas temperaturas (800-1.200°C), en una atmósfera pobre de oxígeno, insuficiente para lograr una combustión completa. Ese gas obtenido, normalmente llamado gas pobre, gas de síntesis o *syngas*, está compuesto por una mezcla de monóxido de carbono, hidrógeno, dióxido de carbono, metano, y otros hidrocarburos, además de residuos sólidos, comúnmente denominados *char* o carbonilla. Los gases combustibles constituyen aproximadamente un 40% del volumen total del gas. En términos de suministro de aire para que se lleve a cabo la reacción, se podría caracterizar a la gasificación como un punto intermedio entre la combustión y la pirólisis.

Como el gas de síntesis producido por la gasificación es, una vez purificado, una sustancia inflamable y combustible, se puede utilizar para alimentar motores de gas o turbinas, para producir energía eléctrica con variada eficiencia. A su vez, la carbonilla resultante se puede comercializar como enmienda de suelo, material base para producir carbón activado, briquetas, o aditivos en distintas industrias, por ejemplo, la cementera. Además de destinarlo a combustión, el gas de síntesis puede actuar como materia prima para la producción de otros combustibles (metanol, etanol, etc.) u otros productos químicos (amoníaco, ácido acético, etc.).

Los sistemas de gasificación para producción de energía eléctrica constan en general de tres sectores principales: la línea de preparación y acondicionamiento de la materia prima (biomasa celulósica, como la foresto-industrial), la línea de gasificación propiamente dicha (incluye el gasificador, equipos de lavado y enfriado de gases, motores de combustión interna y sistemas de ultra enfriado), y la línea de filtrado de gases y tratamiento de aguas de proceso (Rearte, 2015).

En cuanto al acondicionamiento de la materia prima, los residuos foresto-industriales deberán adecuarse según su humedad, densidad y granulometría. El contenido de humedad resulta fundamental, ya que afecta directamente el rendimiento de los equipos. En determinadas ocasiones, la biomasa requerirá un secado previo a la gasificación. Respecto a la granulometría, se prefiere trabajar con elementos cuyo tamaño oscile entre el de un chip y el de un taco o despunte,

evitando las virutas y el aserrín, ya que estos pueden obturar el sistema del gasificador. En este caso, las fracciones más finas encontrarán mejor destino en el proceso de densificación para la producción de pellets y/o briquetas.

Durante las reacciones de gasificación, producidas dentro del reactor o gasificador, ocurren cuatro procesos definidos, que son responsables de la descomposición térmica de la biomasa: secado, pirólisis, combustión y reducción (Estrada & Zapata Meneses, 2004). La biomasa suele introducirse por la zona superior del equipo y va tomando aire del ambiente en cantidades controladas, para garantizar su oxidación parcial y producir el gas. De esta manera, un kilogramo de biomasa se convierte en 2,5 a 3,0 m³ de gas, con un poder calorífico de 1.000 a 1.300 kcal/m³, compuesto mayoritariamente de: nitrógeno (45-55%), monóxido de carbono (15-20%), hidrogeno (15-20%), dióxido de carbono (8-12%), y metano (1-4%). Luego ese gas deberá ser enfriado y filtrado para poder adecuarse a los requerimientos de los motores o turbinas que los emplean como combustible.

Existen distintos tipos de gasificadores: de lecho fijo, de cama fluidizada, de cama fluida circulante, de lecho arrastrado, y de cama de mezcla. El desarrollo de cada diseño no es objeto de este capítulo, aunque quizás sea interesante mencionar que en nuestro país la tecnología no ha madurado aún a nivel industrial o de gran escala. Es por ello que predominan los equipos de tipo lecho fijo, de corriente descendente (*downdraft*), de baja escala, cuya producción eléctrica es menor a 1 MW, que producen un gas limpio, con menor contenido de alquitrán, de buen octanaje, apropiado para introducir en motores de combustión interna. Un ejemplo de estos gasificadores se encuentra en la planta demostrativa del Parque Industrial de Presidencia de La Plaza, Chaco, instalado por el INTI, con tecnología proveniente de la India y adaptada a la biomasa y contexto local (Figuras 6.33 y 6.34).



Figura 6.33. Planta de gasificación de residuos madereros (Presidencia de La Plaza, Chaco).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2015).



Figura 6.34. Gasificador de madera de lecho fijo downdraft (Presidencia de La Plaza, Chaco).
Fuente: propia (viaje de estudio Ing. Ftal., 2015).

La tecnología de gasificación es una estrategia limpia de reducción de residuos y producción tanto de energía eléctrica como de combustibles líquidos, que ha sido utilizada desde hace más de cien años en el mundo entero, y que particularmente en nuestro país posee un amplio margen para crecer y desarrollarse (Knoef, 2005; FAO D.T. N°21, 2020).

Consideraciones finales

La obtención de combustibles a partir de recursos renovables con la intención de sustituir a los derivados de materiales fósiles, en particular, los vinculados al aprovechamiento de los residuos agropecuarios, forestales y sus industrias, debiera constituir el horizonte de desarrollo del sector energético. Encarar esta tarea presentará una buena oportunidad de diversificación de la matriz energética nacional.

Los modelos de producción de energía a partir de biomasa forestal son diversos en cuanto a concepto, tecnología y escala, y ofrecen varios tipos de soluciones energéticas que contribuyen a disminuir la dependencia de los recursos no renovables. La valorización de la biomasa forestal y foresto-industrial, y la constitución de un mercado para estos recursos energéticos, es posible

si se crean los instrumentos necesarios de apoyo a la actividad. Ello deberá ser acompañado por una política de precios de los combustibles alternativos, una normalización de las características de los dendrocombustibles, junto a la seguridad y garantía de su suministro. Esto requiere de una adecuada articulación entre los actores productivos y los implementadores de políticas energéticas, que redundará en un mayor desarrollo del sector con el consecuente crecimiento económico del país.

Referencias

- Antolín, G. (2006). La gestión y el aprovechamiento de los residuos en la industria de la madera. Cuaderno Tecnológico N°2. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial-Unión Europea.
- Camps, M.; Marcos, F. (2002). *Los Biocombustibles*. Barcelona, España: Ed. Mundi-Prensa.
- Canul Tun, S.A. (2013). *Rendimiento y calidad del carbón vegetal elaborado en horno tipo fosa con subproductos forestales de *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. y *Lonchocarpus castilloi* Standl en Campeche* (Tesis de Maestría). Recuperada de Universidad Autónoma de Nueva León, Facultad de Ciencias Forestales. México.
- Estrada, C.A.; Zapata Meneses, A. (2004). Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. *Scientia et Technica*, Año X(25), 155-159.
- FAO. (1983). Métodos simples para fabricar carbón vegetal. Estudio FAO Montes N°41. Roma. ISBN 92-5-301328-1.
- FAO. (2008). Bosques y Energía. Cuestiones Clave. Estudio FAO Montes N°154. Roma. ISBN 978-92-5-305985-0.
- FAO. (2017). The charcoal transition: Greening the charcoal value chain to mitigate climate change and improve local livelihoods. Rome. ISBN 978-92-5-109680-2.
- FAO. (2019). Informe sobre la factibilidad del aprovechamiento de la biomasa forestal de campo. Colección Informes Técnicos N°7. Buenos Aires. ISBN 978-92-5-132013-6.
- FAO. (2020). Actualización del balance de biomasa con fines energéticos en la Argentina. Colección Documentos Técnicos N°19. Buenos Aires. ISBN 978-92-5-132488-2.
- FAO. (2020). Introducción a la dendroenergía. Colección Documentos Técnicos N°21. Buenos Aires. IRAM-ISO 17225. (2019). *Biocombustibles sólidos. Especificaciones y Clases de combustibles*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Kees, S.M.; Michela, J.F.; Skoko, J.J. (2017). Rendimientos y costos de la fabricación de carbón elaborados por pequeños productores del oeste chaqueño. Informe Técnico INTA: C.R. Chaco-Formosa, E.E.A. Sáenz Peña, E.E.A. Santiago del Estero. Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Knoef, H. (2005). *Handbook of biomass gasification*. Holanda: BTG Biomass Technology Group BV.

- Ley 27.191 (2015). *Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica*. Poder Legislativo Nacional. República Argentina. 23 de Septiembre de 2015.
- Marcos Martín, F. (1989). *El carbón vegetal-propiedades y obtención*. España: Ed. Mundi-Prensa.
- MAyDS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación). (2018). Anuario de Estadística Forestal, Especies Nativas 2016. Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2016_-_anuario_de_estadistica_forestal_de_especies_nativas.pdf
- MAGyP (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación). (2019). Plan Estratégico Forestal y Foresto-Industrial 2030. Programa de Sustentabilidad y Competitividad Forestal. Disponible en: <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/sycf/publicacion-forestales-11-diciembre-2019.pdf>
- Nojek, J.P. (2009). *Pellets de madera: una fuente de energía renovable* (Tesis de grado). Recuperada de Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA). Buenos Aires, Argentina.
- Raffaeli, N. (2016). Elaboración de carbón vegetal en horno metálico transportable. *Revista Contacto Rural* N°3, 14-15.
- Rearte, M. (2015). Gasificación de Biomasa en Sistemas *Downdraft*. Documento INTI VRB302-1501. Chaco, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- Uasuf, A.; Hilbert, J. (2012). El uso de la biomasa de origen forestal con destino a bioenergía en la Argentina. Informe Técnico, Año 1 N°3. Castelar, Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.

Conclusiones

Desde el punto de vista de la industrialización de la madera, la República Argentina cuenta con un recurso forestal significativo, tanto a partir del bosque nativo como del bosque cultivado. Si bien el primero ostenta la mayor representatividad a nivel superficie, el segundo proporciona la fuente más significativa de materia prima para uso industrial. Ello posibilita el desarrollo de la actividad foresto-industrial, donde la transformación mecánica corresponde principalmente a la industria de aserrado de primera transformación y de remanufactura de bajo valor agregado. La industria de transformación mecánica (ITM) presenta escalas de producción disímiles a lo largo del territorio, basada predominantemente en plantaciones, siendo la región del NEA el polo foresto-industrial de mayor preeminencia. Dicha actividad genera un volumen significativo de residuos aptos para ser aprovechados desde el punto de vista energético, área competente de la industria de transformación química (ITQ). Asimismo, los bosques nativos, en especial los pertenecientes al Parque Chaqueño, son una fuente importante de dendrocombustibles de menor procesamiento tecnológico.

Es importante resaltar que ambas industrias, ITM e ITQ, ofrecen un alto potencial de desarrollo y expansión estimado para los años venideros, vinculado a la calidad del recurso y excelentes condiciones naturales, la existencia de recursos humanos calificados y capacidades instaladas apropiadas, sumado a un aumento de la demanda interna y externa de los productos analizados en el presente libro, que podrían resultar en un fortalecimiento considerable de la cadena de valor foresto-industrial.

Esta obra fue concebida como una herramienta de estudio y de consulta, tanto para el estudiante como para el graduado de ingeniería forestal y campos afines. Se ha intentado brindar una concepción integradora de los contenidos del eje tecnológico de la carrera, de acuerdo a la práctica profesional real, donde la transversalidad de los temas se manifiesta continuamente y obliga a buscar soluciones que contemplen las variadas aristas que abarca la industrialización de la madera.

Asimismo, no debemos dejar de mencionar la importancia del CTM y sus funciones estratégicas (investigación, extensión, docencia y capacitación), no solo para la FCAYF sino para la comunidad en general, el cual apunta al desarrollo y aprovechamiento de recursos forestales de la región, la construcción y valorización de los productos derivados de la madera en general, y la generación de empleo. Allí, los estudiantes y profesionales tienen la posibilidad de expandir sus conocimientos y capacidades técnicas en un entorno semejante a las industrias de envergadura que existen en nuestro país. Es por ello que este libro recoge parte del camino recorrido en estos

primeros años en el CTM; en paralelo, los contenidos teóricos aportados por esta obra podrán ser utilizados como aplicación práctica en sus instalaciones.

Para finalizar, resulta interesante destacar la diversidad de nuestro país para ilustrar las distintas formas de transformación mecánica y química de la madera y sus residuos foresto-industriales, y el valor de los viajes de estudio de perfil tecnológico propuestos durante la carrera de ingeniería forestal, que han permitido recorrer presencialmente dichas regiones geográficas. La visión integral del procesamiento de la madera a través de las diferentes tecnologías presentadas demuestra la abundancia de temas y amplitud del campo de acción profesional de los ingenieros forestales, quienes son actores fundamentales de una de las actividades económicas que permitirán el crecimiento de Argentina a partir de sus riquezas naturales.

Glosario

Alfajía: pieza aserrada con espesor comprendido entre 19 a 25 mm y ancho entre 76 a 101 mm.

Chapa: pieza obtenida por corte plano (faqueado) con espesor menor a 1 mm.

CLT (*Cross Laminated Timber*): en términos generales, es un tablero estructural formado por al menos 3 capas de tablas de madera encoladas, generalmente sólo por sus caras, y colocadas en capas sucesivas perpendiculares entre sí. Todas las tablas que componen cada capa del tablero deben estar clasificadas estructuralmente.

Costanera, costanero, costero, cachete: pieza parcialmente aserrada que presenta una cara curva.

Fenólico: nombre genérico empleado para expresar la composición del adhesivo empleado en la fabricación de un tablero de madera o a base de madera. En este caso, hace referencia al uso de fenol formaldehído, adhesivo empleado en productos de uso exterior.

HR: humedad relativa: es la relación entre la presión parcial de vapor de agua y la presión de vapor de equilibrio del agua a una temperatura dada. Depende de la temperatura y la presión del sistema de interés. Se expresa en porcentaje, %.

Lámina: pieza obtenida por corte rotativo (debobinado) con espesor mayor a 1 mm.

Listón: pieza aserrada con espesor comprendido entre 12 a 25 mm y ancho entre 38 a 76 mm.

MOE_g: módulo de elasticidad global: expresa la rigidez de una pieza de madera considerando la influencia del esfuerzo de corte; es ligeramente inferior al MOE_{local}. Se expresa en N/mm² o similar; es el módulo que se expresa en las normas IRAM y en el Reglamento CIRSOC 601.

MOE_{local}: módulo de elasticidad local: expresa la rigidez de una pieza de madera sin considerar la influencia del esfuerzo de corte. Se expresa en N/mm² o similar.

MOR: módulo de rotura: expresa la resistencia máxima de una pieza de madera antes de romperse. Se expresa en N/mm² o similar.

PSF: punto de saturación de las fibras: es el punto a partir del cual la madera no presenta más agua libre en sus lúmenes celulares. Su valor teórico es de 30%.

Tabla: pieza aserrada con espesor comprendido entre 18 a 37 mm y ancho entre 150 mm o mayor; longitud mayor a 1,8 m.

Tablón: pieza aserrada con espesor comprendido entre 38 a 74 mm y ancho entre 150 mm o mayor; longitud mayor a 1,8 m.

Tirante: pieza aserrada de escuadría cuadrada o rectangular, con espesor comprendido entre 75 a 126 mm y ancho entre 75 a 249 mm.

Tirantillo: pieza aserrada de escuadría cuadrada o rectangular, con espesor comprendido entre 38 a 74 mm y ancho entre 38 a 150 mm.

Ureico: nombre genérico empleado para expresar la composición del adhesivo empleado en la fabricación de un tablero de madera o a base de madera. En este caso, hace referencia al uso de urea formaldehído, adhesivo empleado en productos de uso interior.

Varilla: pieza aserrada de escuadría cuadrada o rectangular, con escuadría menor al listón.

Viga: pieza aserrada de escuadría cuadrada o rectangular cuyas dimensiones mínimas son de 200 x 200 mm.

Los autores

Coordinadores

Keil, Gabriel D.

Ingeniero Forestal (FCAyF, UNLP, 1986). Magister en Ciencias de la Madera, Celulosa y Papel-Orientación Tecnología de la Madera (FCF, UNAM, 2002). Profesor Titular del curso de Xilotecología; Profesor Adjunto del curso de Industrias de Transformación Mecánica; Docente Responsable del curso de Construcción de Viviendas de Madera, de las carreras de Ingeniería Forestal y Agronómica, Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal (FCAyF, UNLP). Integrante del cuerpo docente de la Maestría en Ciencia y Tecnología de los Materiales Fibrosos (FCEQyN, UNAM). Investigador Categoría III del Programa de Incentivos, SeCyT, Min. de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología de la Nación. Director e investigador del LIMAD (FCAyF, UNLP). Director de proyectos de investigación. Áreas de investigación: ciencia, tecnología e industrialización mecánica de la madera, construcción en madera. Consejero Directivo, Claustro de Profesores (FCAyF, UNLP).

Spavento, Eleana M.

Ingeniera Forestal (FCAyF, UNLP, 2005). Máster (2012) y Doctora (2015) en Investigación en Ingeniería para el Desarrollo Agroforestal (Universidad de Valladolid, España). Especialista en Docencia Universitaria (UNLP, 2020). Profesora Adjunta del curso de Industrias de Transformación Mecánica; Jefe de Trabajos Prácticos del curso de Xilotecología; Docente Co-Responsable del curso de Construcción de Viviendas de Madera, de las carreras de Ingeniería Forestal y Agronómica, Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal (FCAyF, UNLP). Integrante del cuerpo docente de la Maestría en Ciencia y Tecnología de los Materiales Fibrosos (FCEQyN, UNAM). Investigadora Categoría V del Programa de Incentivos, SeCyT, Min. de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología de la Nación. Integrante e investigadora del LIMAD (FCAyF, UNLP). Directora e integrante de proyectos de investigación. Áreas de investigación: ciencia, tecnología e industrialización mecánica de la madera. Coordinadora de Proyectos de Extensión Universitaria (SEU, UNLP). Coordinadora titular de la Comisión permanente de Tecnología e Industrias de la Madera (CTIM), en el marco de la Red Argentina de Ciencia y Tecnología Forestal (REDFOR.ar). Representante suplente por la FCAyF en la REDFOR.ar.

Raffaelli, Natalia

Ingeniera Forestal (FCAyF, UNLP, 2000). Master of Science (2005) y Doctor of Philosophy-PhD (2009) en Recursos Forestales y Bioenergía (College of Forest Resources, University of Washington, EEUU). Profesora Adjunta del curso de Industrias de Transformación Química, de las carreras de Ingeniería Forestal y Agronómica, Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal (FCAyF, UNLP). Docente responsable de los cursos de extensión Elaboración de carbón vegetal y Fabricación de papel artesanal (FCAyF, UNLP). Profesora invitada del curso de Energías Alternativas (FRLP, UTN). Investigadora Categoría IV del Programa de Incentivos, SeCyT, Min. de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología de la Nación. Miembro de la Comisión Directiva e investigadora del LIMAD (FCAyF, UNLP). Integrante de proyectos de investigación. Áreas de investigación: química de la madera, celulosa y papel, productos forestales no madereros, dendroenergía. Directora de Proyectos de Extensión Universitaria (SEU, UNLP). Secretaria docente del Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal (FCAyF, UNLP). Integrante de la Comisión de Actividades Optativas (FCAyF, UNLP). Integrante de la Comisión Asesora Honoraria en Ciencias Agrícolas, Producción y Salud Animal de la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CIC). Miembro del Comité de Biocombustibles Sólidos del Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). Miembro del Foro de Bioeconomía Internacional en representación de Argentina.

Autores

Refort, M. Mercedes

Ingeniera Forestal (FCAyF, UNLP, 2010). Alumna del Doctorado en Ciencias Agrarias y Forestales, (FCAyF, UNLP) y de la Especialización en Docencia Universitaria (UNLP). Jefe de Trabajos Prácticos del curso de Xilotecnología; Ayudante Diplomado del curso de Industrias de Transformación Mecánica; docente integrante del curso de Construcción de Viviendas de Madera, de las carreras de Ingeniería Forestal y Agronómica, Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal (FCAyF, UNLP). Investigadora Categoría V del Programa de Incentivos, SeCyT, Min. de Educación, Cultura, Ciencia y Tecnología de la Nación. Integrante e investigadora del LIMAD (FCAyF, UNLP). Integrante de proyectos de investigación. Áreas de investigación: ciencia, tecnología e industrialización mecánica de la madera. Integrante de Proyectos de Extensión Universitaria (SEU, UNLP). Coordinadora Suplente de la Comisión permanente de Tecnología e Industrias de la Madera (CTIM), en el marco de la Red Argentina de Ciencia y Tecnología Forestal (REDFOR.ar).

Taraborelli, Carla

Ingeniera Forestal (FCAyF, UNLP, 2016). Becaria doctoral del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y alumna del Doctorado en Ciencias Agrarias y Forestales, (FCAyF, UNLP). Ayudante Diplomada del curso Xilotecnología; Docente Adscripta del curso

de Industrias de Transformación Mecánica; docente integrante del curso de Construcción de Viviendas de Madera, de las carreras de Ingeniería Forestal y Agronómica, Departamento de Ingeniería Agrícola y Forestal (FCAyF, UNLP). Miembro de la Comisión Directiva e investigadora del LIMAD (FCAyF, UNLP). Integrante de proyectos de investigación. Áreas de investigación: ciencia, tecnología e industrialización mecánica de la madera. Integrante suplente de la Comisión de Evaluación de Plan de Estudios de la carrera de Ingeniería Forestal.

Industrialización de la madera : transformación mecánica y química : tecnologías y puesta en valor sustentable / Gabriel D. Keil ... [et al.] ; coordinación general de Gabriel D. Keil ; Eleana M. Spavento ; Natalia Raffaeli ; prólogo de Ismael Andía. - 1a ed. - La Plata : Universidad Nacional de La Plata ; EDULP, 2022.
Libro digital, PDF - (Libros de cátedra)

Archivo Digital: descarga
ISBN 978-950-34-2145-1

1. Ingeniería Forestal. 2. Madera. 3. Industria Mecánica. I. Keil, Gabriel D., coord. II. Spavento, Eleana M., coord. III. Raffaeli, Natalia, coord. IV. Andía, Ismael, prolog. CDD 620.12

Diseño de tapa: Dirección de Comunicación Visual de la UNLP

Universidad Nacional de La Plata – Editorial de la Universidad de La Plata
48 N.º 551-599 / La Plata B1900AMX / Buenos Aires, Argentina
+54 221 644 7150
edulp.editorial@gmail.com
www.editorial.unlp.edu.ar

Edulp integra la Red de Editoriales Universitarias Nacionales (REUN)

Primera edición, 2022
ISBN 978-950-34-2145-1
© 2022 - Edulp

n
naturales


Edulp
EDITORIAL DE LA UNLP



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA