



# 4° Jornadas ITE 2017

4, 5 y 6 de abril de 2017

---

**CUARTAS JORNADAS de INVESTIGACION,  
TRANSFERENCIA y EXTENSION de la  
FACULTAD DE INGENIERIA**

---

[secit@ing.unlp.edu.ar](mailto:secit@ing.unlp.edu.ar) | [www.ing.unlp.edu.ar](http://www.ing.unlp.edu.ar)

Calle 1 y 47 - La Plata (B1900TAG)



# 4° Jornadas ITE 2017

## Resúmenes extendidos - 2017

*Secretaría de Investigación y Transferencia  
Facultad de Ingeniería - UNLP.*

Ing. Liliana M. Gassa  
*Secretaria de Investigación y Transferencia*

Lic. Gabriela Caorsi  
*Directora de Investigación y Transferencia*

Sr. Leandro Grasso  
*Asistente*



Cuartas Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión / Stella Abate ... [et al.] ;  
compilado por Gabriela Caorsi ; Liliana Mabel Gassa. - 1a edición para el alumno  
- La Plata : Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ingeniería, 2017.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-950-34-1453-8

1. Investigación. I. Abate, Stella II. Caorsi, Gabriela , comp. III. Gassa, Liliana  
Mabel , comp.

CDD 378.007

# Autoridades de la Facultad de Ingeniería

## ***Decano***

Dr. Ing. Marcos Actis

## ***Vicedecano***

Ing. Horacio Frene

## ***Secretario Académico***

Mag. Ing. José Scaramutti

## ***Prosecretario Académica***

Ing. Fernando Gutiérrez

## ***Secretaria de Investigación y Transferencia***

Ing. Liliana Mabel Gassa

## ***Director de la Escuela de Postgrado y Educación Continua (EPEC)***

Dr. Ing. Sergio Giner

## ***Secretaría de Extensión y Vinculación con el Medio***

Ing. Gustavo Saralegui

## ***Secretaria de Gestión y Seguimiento de Actividades Curriculares***

Cta. Cfica. Rossana Di Domenicantonio

## ***Prosecretaría de Gestión y Seguimiento de Actividades Curriculares***

Ing. Yanina Hollman



# ÍNDICE POR AUTOR

<b>Autor</b>	<b>Código</b>	<b>Página</b>
ABATE, Stella	AP1	P. 186
ACTIS, Marcos	IA2	P. 22
AGOSTINI, Marcial	IE6	P. 344
ALDASORO, Roberto	IAG2	P. 172
ALGOZINO, Santiago	AI9, CB12	P. 72, P. 259
ALVAREZ, Raúl	IE16	P. 405
ALZATE MARÍN, Juan	IQ4	P. 601
ANDERSON, Jorge	IE9	P. 363
ANGHEBEN, Enrique	IH2, IH3, IH5	P. 437, P. 443, P.455
ANTOKOLETZ, Sebastián	IA3	P. 28
AQUILANO, Luisina	CB3, CB4	P. 205, P. 212
AROCAS, Sergio	IM15	P. 560
AROSATEGUI, Walter	IE6, IE7	P. 344, P. 350
ARROJO, Carlos	IE5	P. 334
ATTADEMO, Federico	IA18	P. 136
AZPEITIA, Anahí	IM5	P. 494
BARBA, Salvatore	IM7	P. 507
BARRERA, John	CB10	P. 247
BARRETO, Guillermo	IQ11	P. 648
BENOIT, Clement	IE2	P. 314
BERARDOZZI, Eliana	IH1	P. 431
BERGAMINI, Javier	Ag2	P. 172
BERTOLA, Nora	IQ5	P. 608
BIANCHI, Ana	CB7, CB8	P. 229, P. 235
BIANCHI, Guillermo	IH3, IH4	P. 443, P. 449
BIDEBERRIPE, Hernán	IQ12	P. 655
BILMES, Pablo	IM1, IM2, IM4, IM5, IM6	P.468, P.477, P.488, P.497, P.501

BONARDO, Leandro	IH2	P.437
BONETTO, Rita	IM5	P.494
BONOLDI, Joaquín	IH5	P.455
BOSC, Cristian	IM14	P.550
BOTANA, Adrián	CB8	P.235
BOTCHER, Carlos Axel	CB5, CB6	P.218, P.224
BOTTANI, Asdrúbal	IA2	P.22
BRANNE, Julia	IH5	P.455
BRAUN, Matías	IC2, IC4	P.288, P.301
BUCARI, Néstor	CB2	P.199
BUFFARINI, Leandro	CB9	P.241
BULACIOS, Esteban	IM15	P.560
BURELA, Ezequiel	IA14	P.105
CAGNOLI, Ma. Virginia	IQ10	P.640
CALANDRA, Ma. Valeria	CB12	P.259
CALIFANO, Alicia	IQ1, IQ7	P.582, P.621
CALVETTY RAMOS, Gabriela	IH2	P.437
CALVO, Gabriela	IH6	P.461
CANO, Leonardo	IQ10	P.640
CAP, Nelly Lucia	CB9	P.241
CAPPELLETTI, Marcelo	IE4	P.327
CAPITTINI, Guillermo	IA11	P.85
CARAVELLI, Alejandro	IQ4	P.601
CARLOTTO, Adrián	IE10	P.368
CASAS, Guillermo	IE4	P.327
CASAS, Remedios	IA20	P.151
CASELLA, Mónica	IQ12	P.655
CASTAN, Nelson	IM13	P.544
CASTAÑEDA, Ma. Teresita	IE1	P.308
CASTELLANO, Gustavo	IM5	P.494
CASTELLI, Leonardo	IA7	P.59
CASTRO, Lorena	IA18	P.136
CATALANO, Leonardo	IE16	P.405
CEDOLA, Ariel P.	IE4	P.327
CHAPELA, Matías	IA12	P.91
CHARPENTIER, Florencia	CB7	P.229



CIBEIRA, Natalia	IP1, IP2	P.569, P.573
CICCHETTI, Juan	IM10	P.527
CIOFFI, Julieta	IH5	P.455
CIPPONERI, Marcos	IH6	P.461
COGO, Jorge	IE17	P.412
COLMAN LERNER, Jorge Esteban	IQ5	P.608
COPPA, Matías	IA19	P.144
CORDERO, Ma. Cristina	IE12, IE13, IE14, IE15	P.380, P.386, P.393, P.399
CORREA AGUIRRE, Juan	CB8	P.235
COSTA, Joaquín	IE8	P.356
COSTA, Viviana	CB1	P.193
COUSELO, Romina	IP1, IP2	P.569, P.573
COZZARIN, Ana Laura	IM9	P.520
CRESPI, Gabriel	IP1, IP2	P.569, P.573
CULCASI, J. Daniel	IM3	P.484
CZERWIEN, Juan Carlos	CB4, CB5, CB6	P.212, P.218, P.224
DAGUERRE, Lisandro	IC3	P.294
DALINGER, Nicolás	IH5	P.455
DE BATTISTA, Hernán	IE1, IE3	P.308, P.320
DEFRANCO, Gabriel	IM7, IM8	P. 507, P.514
Del CONTE, Andrés	IM13	P.544
De La PUENTE, Juan	IE8	P.356
DELNERO, Juan S.	IA9, CB12	P.72, P. 259
DEL RIO, Laura	CB2	P.199
DEVECE, Eugenio	CB3, CB4, CB5, CB6	P.205, P.212, P.218, P.224
DI BERNARDI, Carlos	IA12, IA13, IA14, IA15, IA16, IA17, IA18, IA19, IA20, IA21	P.91, P.98, P.105, P.113, P.120, P.127, P.136, P.144, P.151, P.157
DIAS, Ricardo	IE5	P. 334
DIAZ, Juan	IE17	P. 412
DIEZ, Bruno	IE7	P. 350
DI GREGORIO, Pablo	IA20, IA21	P. 151, P.157
DI JORGI, Ariel	IA7	P. 59
DI LUCENTE, Fiorella	IH6	P. 461
DIMA, Jimena	IQ3	P. 595
D'IORIO, Juan Ignacio	IA19	P. 144

ECHAPRESTO GARAY, Iban	IA10	P. 78
ECHARRI, Juan M.	IM1, IM2, IM3	P. 468, P. 477, P. 484
ECHARRI, Tomás	IM1	P.468
ECHEVERRIA, Gustavo	CB8	P.235
EISENBERG, Patricia	CB8	P.235
EKKERT, Tatiana	IM4, IM6	P.488, P.501
EZEYZA, José	IH5	P.455
FELOY, Lucas	IM11	P.533
FERNANDEZ, Germán	IH4	P. 449
FERNANDEZ BUSSE, Marcelo	IE15	P.399
FERRARI, Flavio	IE11, IE12, IE13, IE14, IE25	P.374, P.380, P.386, P.393, P.399
FERREYRA José	IE13	P.386
FLEGO, Silvana P.	CB13, CB14	P.266, P.274
FONTANA, Marcos	IA3	P.28
FOURIER, Gisele	IC4	P.301
FRIGOLI , Elisa	IC3	P.294
FUERTES, Laura	IM7, IM8	P.507, P.514
FUSHIMI, Emilia	IE3	P.320
GALARRAGA, Gonzalo	IA2	P.22
GAMARRA, Ariel	IA8	P.66
GARCIA EINSCHLAG, Fernando	IH4	P.449
GARCIA SAINZ, Mariano	IA8, IA10	P.66, P.78
GARCIA, Alejandro	IH4	P.449
GARCIA, Javier	IE17	P.412
GARELLI, Fabricio	IE1, IE2, IE3	P.308, P.314, P.320
GATTI, Florencia	IM4, IM6	P.488, P.501
GAVINO, Sergio	IM7, IM8	P.507, P.514
GIALONARDO, José Ignacio	IE11, IE14	P.380, P.393
GIANNUZZI, Leda	IQ6	P.614
GIMENEZ, Belén	IQ6	P.614
GONZALEZ, Alfredo	IM9, IM10, IM11	P.520, P.527, P.533
GONZALEZ, Mónica	IE11, IE14	P.380, P.393
GRAIVER, Natalia	IQ6	P.614
GRUMEL, Eduardo	CB9	P.241



GUERRA LOPEZ, José	CB7	P.229
GUERRERO BORGES, Verónica	IH6	P.461
GÜIDA, Jorge	CB7	P.229
GUTIERREZ, Ma. Victoria	IC1	P.281
HEIMBIGNER, Nicolás	IH5	P.455
HENRIQUEZ MATTEUS, Javier	IA14, IA15	P.105, P.113
HERNANDEZ, Mauricio	IE10	P.368
HO, Yen Kun	IA5	P.46
HOLLMAN, Yanina	IM15	P.560
ISIDORI, Alberto	IE19	P.424
JACA POZZI, Guadalupe	IH5	P.455
JACOME JACOME, José	IA18	P.136
JAUREGUI LORDA, Matías	IA6	P.52
JIMENEZ BARON, Diego	IA15	P.113
JUAREZ, José M.	IE10	P.368
JUNCIEL, Luis	CB8	P.235
JUSTO, Claudio	CB1	P.193
KANG, Kyung	AP1, IM4, IM5, IM6	P.186, P.488, P.494, P.501
KEEGAN, Sergio	IQ11	P.648
KUNYSZ, Eduardo	IE9	P.363
LACOSTE, Juan	IM9	P.520
LAMARRA, Javier	IQ8	P.627
LARA, Marianela	IM7, IM8	P.507, P.514
LARSEN, Diego	IC3	P.294
LECOT, Carlos Javier	IQ8	P.627
LEMONS BARBOZA, Adriana	IM4, IM5, IM6	P.488, P.494, P.501
LIMANDRI, Silvina	IM5	P.494
LLORENTE, Carlos	IM1, IM2, IM4, IM5, IM6	P.468, P.477, P.488, P.494, P.501
LOBO, Cintia	IQ5	P.608
LOPEZ, Ernesto	IE17	P.412
LOPEZ LA VALLE, Ramón	IE17	P.412
LOPRESTI, Laura	IM7, IM8	P.507, P.514
LORENTE, Hugo	IE10	P.368

LORENZO, Gabriel	IQ7	P.621
LUCINO, Cecilia	IH1, AP1	P.431, P.186
LYONS, Silvina	AP1	P.186
MADDONNI BRITO, Esteban	IA18	P.136
MAFFIA, Ernesto	IM10, IM12	P.527, P.539
MANASSERO, Rodrigo	IA4	P.40
MANTELLI, Pablo	IA11	P.85
MARAÑÓN DI LEO, Julio	IA9, CB12	P.72, P. 259
MARIANI, Néstor Javier	IQ11	P.648
MARIN SILVA, Diego	IQ9	P.633
MARTINEZ, Angel	IM1, IM2	P.648, P.477
MARTINEZ, Osvaldo	IQ11	P.648
MARTINEZ DEL PEZZO, Andrés	IA2	P.22
MASSA, Pablo A.	IE18	P.418
MAYO DIAZ, Mariano	IM12	P.539
MAZANTE, Gustavo	IM13	P.544
MENDOZA ZELIS, Pedro	CB4	P.212
MENGHINI, Matías	IA1	P.15
MESCHINI, Juan	IA7	P.59
MESON, Alejandro	CB11	P.253
MIÑO, Marco	IC4	P.301
MORCELLE del VALLE, Pablo	IE16	P.405
MORI CORTEZ, Noelia	IQ7	P.621
MULE, Ernesto	IC3	P.294
MUSMECI, Maximiliano	IM10	P.527
NADAL MORA, Vicente	IA4	P.40
NASTTA, Hernán	IE5	P.334
NUÑEZ, Natalia	IQ12	P.655
NUÑEZ, Sebastián	IE1	P.308
ORTIGOZA, Gabriela	IH1	P.431
OSIO, Jorge	IE9, IE12	P.363, P.380
PALACIO, Luis	CB14	P.274
PALAVICCINI, Inés	IM3	P.484
PARDO, Cristian	IA18	P.136



PAREDES, Diana	IH6	P.461
PASQUEVICH, Facundo	IA2	P. 22
PAUS, Pablo	IAg2, IAg3	P.172, P.178
PELTZER y BLANCA, Eitel	IE4	P.327
PENDON, Manuela	IP1, IP2	P.569, P.573
PEREZ CALDERON, John	IQ1, IQ2	P.582, P.589
PEZZOTTI, Santiago	IA4, IA21	P.40, P.157
PIECHOCKI, Joaquín	IA4, IA16, IA17	P.40, P.120, P.127
PINOTTI, Adriana	IQ8, IQ9	P.627, P.633
PINTO, Federico	IA12	P.91
PITRELLI, Sergio	IA12, IA21	P.91, P.157
PORRAS, Isidro	IA14	P.105
PUGA, Gerardo	IE17	P.412
PUNTE, Graciela	CB7, CB8	P.229, P.235
QUIJANO, Antonio	IE6	P.344
QUIJANO, Ma. Victoria	IE6	P.344
QUINTEROS, Ignacio	IAg3	P.178
RABAL, Héctor	CB9	P.241
RAMIREZ DIAZ, Gabriel	IA16, IA17	P.120, P.127
RAMOS, Marcelo	CB7	P.229
RAPALLINI, José A.	IE6, IE7, IE9, IE12	P.344, P.350, P.363, P.380
RATTI, Juan Marcelo	IM13	P.544
REALE, Natalia	IA4, IQ10	P.40, P.640
RICCI, Edgardo	IE6, IE7, IE8	P.344, P.350, P.356
RIOJAS ROLDAN, Helio	IC2	P.288
RIVERO, Sandra	IQ8, IQ9	P.627, P.633
ROCCO, Claudio G.	IC1, IC2, IC4	P.281, P.288, P.301
RODRIGUEZ, Matías	IA18	P.136
RODRIGUEZ, Santiago	IE17	P.412
RODRIGUEZ ACEVEDO, Gabriela	IA14, IA15	P.105, P.113
ROMANAZZI, Pablo	IH2	P.437
ROMANO, José	IAg2	P.172
ROMERO, Stefanía	IA14	P.105
RONCAGLIOLO, Pedro Agustín	IE17	P.412

ROSALES, Nicolás	IE3	P.320
ROSENDO, Juan L.	IE2	P.314
ROSSI, Luciano	IH5	P.455
ROSSI GRAD, Sebastián	IE7	P.350
SAGER, Gerardo	IE10	P.368
SALVIOLI, Mónica	IH6	P.461
SANMARCO, Enrique	IE14	P.393
SANTOIANI, Gastón	IA4	P.40
SANTOS, Ma. Victoria	IQ1, IQ2	P.582, P.589
SANZ, Cecilia	CB2	P.199
SARALEGUI, Gustavo	IM1	P.468
SCANDURA, Matías	IA18	P.136
SCARABINO, Ana	IA5, IA6	P.46, P.52
SCARAMUTTI, José	IE5	P.334
SCILLONE, Germán	IE17	P.412
SEDE, Nahuel	IE7	P.350
SEQUEIROS, Cynthia	IE6	P.344
SERRANGELI, Juan	IQ3	P.595
SERRICHIO, Sergio	IM13	P.544
SIRI, Guillermo	IQ12	P.655
SISTI, Jorge	IAg1	P.166
SMIDT, Javier	IE17	P.412
SOTO, Leandro	IAg1	P.166
SOUCASE, Bernabé Marí	IE4	P.327
SPADARI, Germán	IH3	P. 443
SUAREZ, Sergio	IM5	P.494
SZELAGOWSKI, Pablo	IA20	P.151
SZNAJDERMAN, Lucas	IA3, IA19	P.28
TAULAMET, María José	IQ11	P.648
TEBALDI, Myrian	CB10	P.247
TERMINIELLO, Lucas	IE13	P.386
TITTONEL, Marcelo	IP1, IP2	P.569, P.573
TORRES SANCHEZ, Rosa Ma.	CB8	P.235
TORROBA, Patricia L.	CB3, CB4, CB5, CB6	P.205, P.212, P.218, P.224

TORROBA, Roberto	CB10	P.247
TOVIO, Daniel	IM9	P.520
TREJO, Sorayda	CB10	P.247
TREPAT, Juan	IE18	P.418
TRINCAVELLI, Jorge	IM5	P.494
TRIPOLI, Ma. de las Mercedes	CB3	P.205
TRIVI, Marcelo	CB9	P.241
ULLOA, Patricia	IA4	P.40
URANO, Ana	IA13	P.98
VALINOTI, Stefania	IH5	P.455
VARGAS LARREA, José	IE15	P.399
VELEZ ZEA, Alejandro	CB10	P.247
VERA, José	IE12	P.380
VERICAT, Fernando	CB11	P.253
VERONA, Luciano	IA7	P. 59
VILLA, Edgardo Ignacio	IC1, IC2, IC3	P.281, P.288, P.294
VILLAR, Juan Ignacio	IA3, IA7	P.28, P. 59
VITALE, Nicolás	IA20	P.151
VOGET, Claudio	IE1	P.308
VUCETICH, Danilo	IM11	P.533
WILLIAMS, Eduardo	IC3, IP1, IP2	P.294, P.569, P.573
YARZA, Florencia	IQ10	P.640
ZAPPITELLI, María Paula	IC1	P.281
ZARITZKY, Noemí E.	IQ1, IQ2, IQ3, IQ4, IQ5, IQ6, IQ7	P.582, P.589, P.595, P.601, P.608, P.614, P.621
ZUZULICH, José	IM1, IM2	P.468, P.477



AERONÁUTICA



## PROTESIS DE RODILLA POLICENTRICA IMPRIMIBLE

Menghini, Matías

UIDT – GEMA, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería de La Plata  
Calle 48 y 116 La Plata. CP 1900. Contacto: [matias.menghini@ing.unlp.edu.ar](mailto:matias.menghini@ing.unlp.edu.ar)

**Palabras Claves:** Prótesis, Rodilla policéntrica, pie.

### INTRODUCCIÓN

El ser humano ha logrado a través de su creatividad y de los nuevos descubrimientos tecnológicos, cubrir las necesidades que se le presentan, logrando materializar herramientas que le hacen la vida más sencilla. Estas necesidades no sólo involucran las que son externas a él, como el crear distintos dispositivos o herramientas de trabajo, también se le han presentado necesidades que afectan su propio cuerpo. Una de ellas es la falta de una o varias de sus extremidades.

La discapacidad física de miembro inferior afecta a miles de personas, entre las cuales están los amputados transfemorales, quienes no tienen la articulación femoro-tibial móvil y a quienes se les dificulta la movilidad, y en general las actividades cotidianas, debido a la utilización de muletas para moverse.

En Argentina las prótesis que se utilizan de miembro inferior son importadas, dependiendo de las características y ventajas de las mismas, cuanto más modernas, más caras, así como cómoda y funcional.

Cada ser humano que necesite una prótesis, es diferente, con necesidades distintas, por ello el diseño debe ser de gran versatilidad a la hora de adaptarse de manera eficiente a los distintos usuarios.

La necesidad de una prótesis es un problema que ha existido desde mucho tiempo atrás, el cual a través de los años ha tenido la responsabilidad de proponer una solución que permita al paciente reincorporarse a sus actividades cotidianas lo más rápido posible, sin tiempo de espera, desde que el mismo está apto para poder comenzar a usar una prótesis. Para personas de bajos recursos sin cobertura médica la espera es de 12 a 18 meses aproximadamente para obtener una prótesis, periodo en el cual, dependiendo de la edad y actividad que realiza, comienza a perder el interés y se le dificulta el aprendizaje para la correcta utilización de la prótesis, lo que conlleva al mal o escaso uso una vez entregada la misma.

La respuesta a dicha problemática que representa una amputación del miembro inferior que contemple la solución más confiable, es una prótesis de rodilla, con un mecanismo policéntrico de cuatro barras imprimible mediante una impresora 3D convencional de bajo costo, bajo la tecnología (FDM) Fused Deposition Modeling. El desarrollo, consistió en el diseño y construcción y prueba de una prótesis total de rodilla policéntrica imprimible de bajo costo Fig. 1.

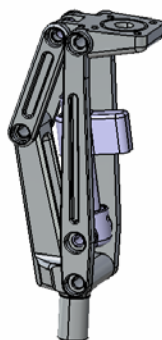


Figura 1: Prótesis de rodilla policéntrica imprimible de bajo costo.

## DISEÑO

En la actualidad existen diversos tipos de prótesis de articulación de rodilla, que se basan en dos mecanismos, el de tipo bisagra o de eje simple y el policéntrico; el de tipo bisagra, es más sencillo, tiene limitaciones, ya que en virtud de su simpleza, no tienen control de postura y los pacientes deben de hacer uso de su fuerza muscular para mantenerse estables cuando se encuentran de pie; por otra parte, el mecanismo de tipo policéntrico es más complejo. Actualmente es el más eficiente porque tiene mayor estabilidad en la marcha que el de tipo bisagra y no se necesita fuerza muscular para mantener el equilibrio.

La gran ventaja del arreglo policéntrico es que permite la estabilidad de la rodilla cuando se hace contacto con el talón y reduce la estabilidad al momento del despegue de la punta del pie, con ello se incrementa la distancia de contacto con el piso y se reduce la posibilidad de tropiezo.

Las prótesis de rodillas policéntricas, son sistemas de cuatro barras, porque tienen cuatro eslabones rígidos y cuatro puntos de pivote. El diseño es más complejo ya que está formado por centros múltiples instantáneos de rotación; esencialmente consta de articulaciones anteriores y posteriores. Esta complejidad optimiza algunas características de la marcha, incrementando los niveles de estabilidad en la fase de apoyo y brindando mayor naturalidad al movimiento de oscilación. En este diseño, la suma de las rotaciones policéntricas potenciales, determina un centro instantáneo de rotación para cada instante del movimiento de la prótesis. La estabilidad en los mecanismos policéntricos es determinada por la distancia de sus centros instantáneos de rotación, cuanto mayor es la distancia, mayor es la estabilidad inherente del dispositivo durante la fase de la postura recta o de pie.

A partir de las investigaciones, cálculos y resultados realizados se propuso un diseño mecánico haciendo uso del programa de diseño CATIA, donde se evaluaron las formas, el tamaño y simulaciones del movimiento (Figuras. 2, 3, 4), para luego realizar la verificación de esfuerzos, mediante simulación numérica.

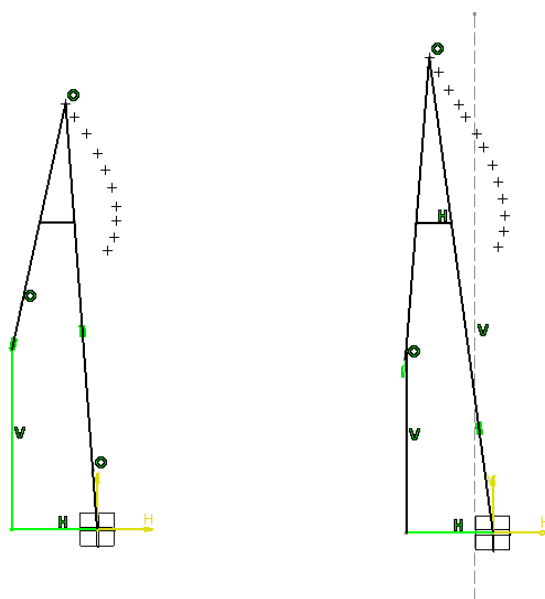


Figura 2: Variación de centro Instantáneo de rotación durante el movimiento para distintos diseños.

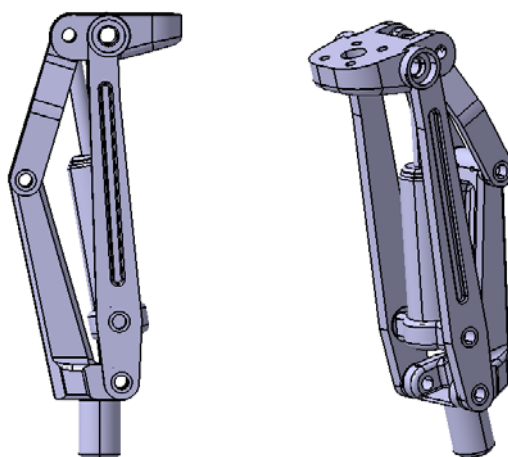


Figura 3: Diseño original propuesto de Prótesis de rodilla policéntrica

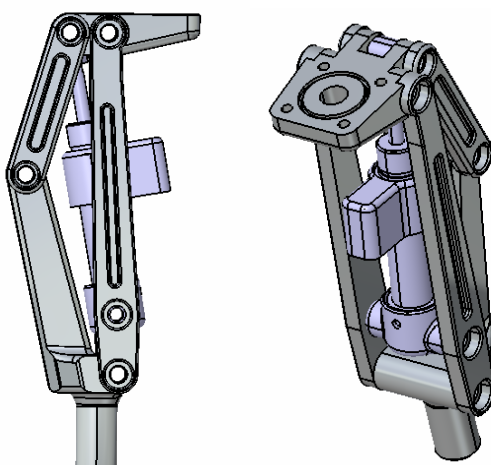


Figura 4: Diseño final construido de Prótesis de rodilla policéntrica

### SELECCIÓN DEL MATERIAL A UTILIZAR EN LA FABRICACION

La selección del material empleado fue considerada a partir de las propiedades físicas y mecánicas, disponibilidad y costo, de este análisis se desprende la utilización de (PLA) ácido poliláctico para la fabricación de las partes, en la en la Tabla 1 se detallan las propiedades del material antes del depositado y en la Tabla 2 se detallan las propiedades obtenidas mediante ensayos de tracción de probetas impresas Fig. 5, bajo las mismas condiciones como se construirían las partes de la prótesis.

Tabla 1: Propiedades del PLA

Propiedades	PLA	
	Valor	Valor medio
Tensión a la tracción última	16.0 - 114 MPa	50.1 MPa
Tensión a la tracción límite	16.0 - 103 MPa	44.7 Mpa
Modulo elasticidad	2.5- 3.5 GPa	3 GPa

Tabla 2: Propiedades obtenidas mediante ensayo de tracción de probetas impresas de PLA

Propiedades	PLA
	Valor ensayo
Tensión a la tracción última	39.7 MPa
Tensión a la tracción límite	30 MPa
Modulo elasticidad	2.73 GPa

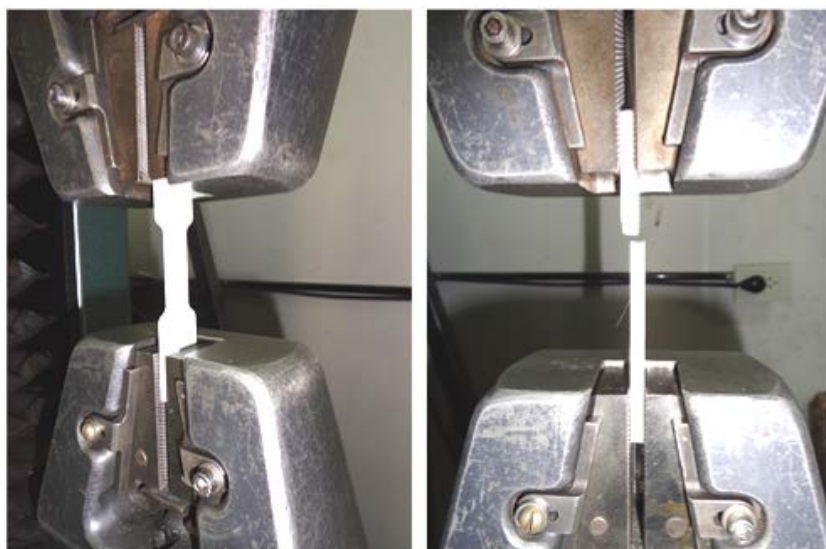


Figura 5: Probetas de material en máquina de ensayos INSTRON

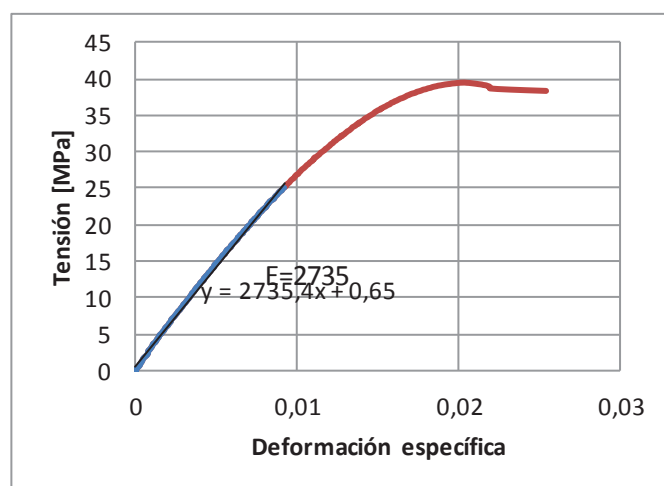


Figura 6: Curva obtenida de ensayo de probeta impresa de (PLA) ácido poliláctico

## DETERMINACION DE ESFUERZOS MEDIANTE SIMULACION NUMERICA

La determinación de los esfuerzos sobre el diseño planteado, se realizó mediante la utilización del software CATIA, para ello se modeló cada componente principal de la prótesis por separado en forma numérica, para verificar el estado de tensiones y deformaciones Figura 7.

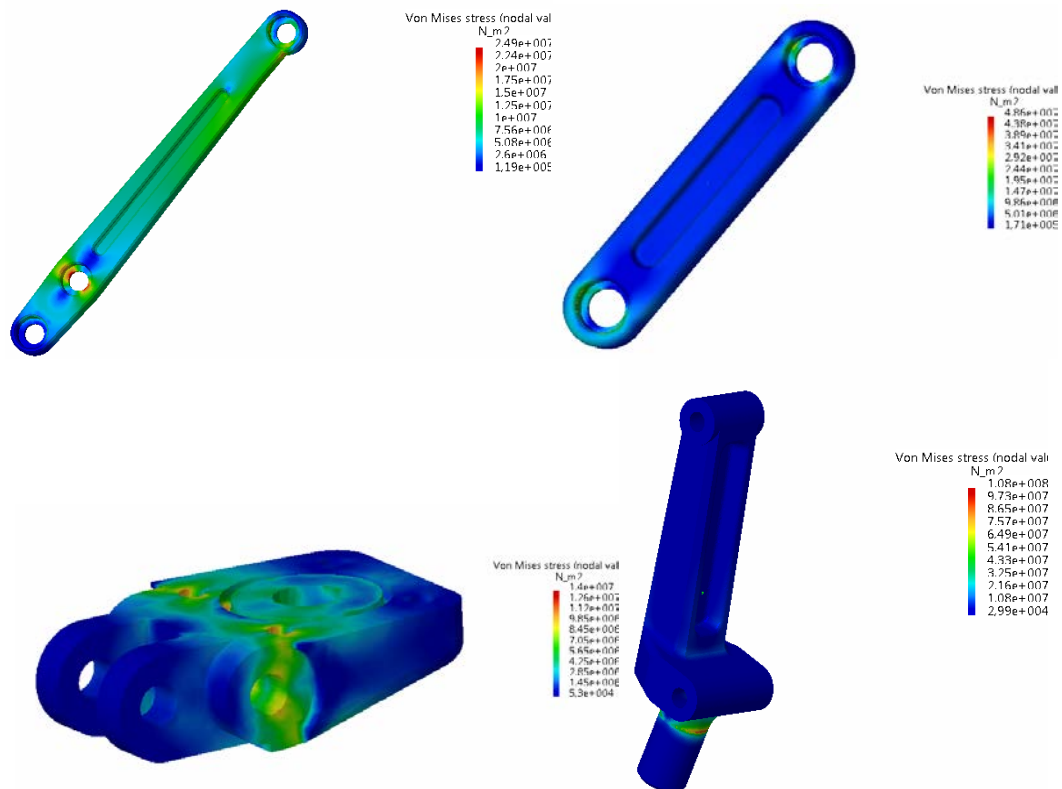


Figura 7: Simulación numérica de partes principales del diseño propuesto.

## CONSTRUCCION DE PROTOTIPO

El diseño propuesto se construyó mediante la utilización de una impresora 3D convencional de bajo costo, de tecnología (FDM) Fused Deposition Modeling, el material utilizado fue (PLA) ácido poliláctico para todas las piezas plásticas, a su vez para la construcción se utilizaron diversos materiales y elementos, entre ellos aluminio, cilindro neumático, rodamientos, resorte y tornillería convencional. En las Figuras 8 y 9, se presentan una de las partes durante la impresión y el primer y segundo prototipo final terminado.

Para la realización de las pruebas funcionales, se ensambló la prótesis construida a un cono de enchufe y un pie en materiales compuestos (Figura 10).



Figura 8: Impresión de parte inferior de prótesis de rodilla





Figura 9: Primer y segundo prototipo de rodilla construido



Figura 10: Prótesis de rodilla policéntrica imprimible de bajo costo, integrada a prótesis de pie y cono de enchufe.

## CONCLUSIONES

Se pudo diseñar y construir una prótesis total de rodilla policéntrica, mediante una impresora 3D convencional de bajo costo, la misma se fabricó con solo el 6% del costo actual en el mercado de prótesis con características similares, en cuanto a las prestaciones y performance.

Las primeras pruebas realizadas en pacientes fueron satisfactorias, ya que el prototipo respondió según lo esperado, tanto en paciente que nunca había utilizado prótesis alguna desde su amputación, como así también en paciente con amplia experiencia en uso de prótesis de rodilla, tanto de eje fijo como policéntricas.

En la Figura 11, se muestra una secuencia de imágenes de dos de las pruebas realizadas en pacientes.

Actualmente se están realizando pruebas funcionales en paciente, de las cuales se desprende el correcto funcionamiento del prototipo planteado.



Figura 11: Prueba de prótesis en paciente

Trabajo presentado en el III CONGRESO INTERNACIONAL DE BIOINGENIERÍA, celebrado en el marco de la 18 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura (XVIII CCIA 2016) La Habana, Cuba.

## REFERENCIAS

- [1]Otto Bock Health Care, “Prótesis de rodilla”.  
[http://www.ottobock.com/cps/rde/xchg/ob\\_com\\_en/hs.xsl/611.html](http://www.ottobock.com/cps/rde/xchg/ob_com_en/hs.xsl/611.html)
- [2]C.W. Radcliffe, “Four-bar linkage prosthetic knee mechanisms: kinematics, alignment and prescription criteria”, Mechanical Engineering, University of California Berkeley, ISPO, Prosthetic and Orthotics International, Vol. 18, 159-173, 1994.
- [3]MatWeb, «MatWeb Material Property Data» [En línea]. Available: <http://www.matweb.com/index.aspx>.
- [4]A. Gebhardt, «Understanding Additive MAnufacturing: Rapid Prototyping, Rapid tooling, Rapid Manufacturing» Hanser Gardner Pubs. 978-1-56990-507-4.

## DISEÑO DE TORRE RETRÁCTIL PARA UMBILICALES DE SEGUNDA ETAPA DE COHETES

Andrés Martínez del Pezzo, Asdrubal Bottani, Gonzalo Galarraga, Facundo Pasquevich,  
Marcos Actis.

UIDET – GEMA, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería de La Plata  
Calle 48 y 116 La Plata. CP 1900. Contacto: [facundo.pasquevich@ing.unlp.edu.ar](mailto:facundo.pasquevich@ing.unlp.edu.ar)

### 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de umbilicales son manojos de cables que funcionan como conexiones eléctricas que vinculan el vehículo lanzador con el centro de operaciones del sitio de lanzamiento. Estas conexiones deben mantenerse vinculadas al vehículo hasta unos instantes posteriores al encendido del motor principal del cohete. Cuando este comienza a despegar, las conexiones deben desvincularse y liberar la zona lo más rápido posible para no representar un obstáculo en la trayectoria del vehículo.

Para liberar la zona de restricción de los cables de umbilicales, se utiliza un sistema de torre retráctil. El movimiento de la torre se inicia al comenzar el ascenso del cohete, consecuentemente los cables umbilicales son arrastrados por la torre fuera de la zona de la trayectoria del vehículo. El diseño de la torre se basa en una estructura reticulada con un contrapeso excéntrico a su eje de rotación. Al ser liberada, el movimiento rotacional se logra debido al momento producido por dichos contrapesos.

### 2. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

El diseño de la torre retráctil debe contemplar que el accionamiento y posterior frenado de la torre se produzca de forma autónoma sin necesidad de señales de control. Así mismo, la torre debe salir del área de restricción lo suficientemente rápido para no presentar un obstáculo para el vehículo en su trayectoria ascendente.

La torre posee dos configuraciones: una denominada “supervivencia”, en la cual el sistema permanece inmovilizado y la otra llamada “lanzamiento”.

En el estado supervivencia, la torre se vincula a su base, imposibilitada de todo movimiento. La estructura debe ser capaz de soportar las cargas gravitacionales y de viento especificadas por la reglamentación vigente para la zona de emplazamiento.

En la configuración de lanzamiento, la vinculación de la torre con su base permite la rotación al momento del accionamiento. Durante esta fase, los esfuerzos en la estructura se deben principalmente a la aceleración del sistema y a las fuerzas gravitacionales.

En consecuencia, la torre debe resistir las cargas dinámicas y estáticas presentes en ambas configuraciones y su altura que determinada por los enchufes de los cables umbilicales ubicados en la segunda etapa del cohete. Un aspecto importante a la hora del diseño es la masa y la rigidez del conjunto ya que se encuentra sometido a grandes aceleraciones.

### 3. DISEÑO DE LA TORRE RETRÁCTIL

#### 3.1. Tipología Estructural

En atención a los requerimientos de diseño señalados, el desarrollo de la torre se plantea como una estructura reticulada, compuesta por tres tramos de diferentes secciones transversales. La tipología estructural elegida obedece a obtener rigidez suficiente con una relativa baja masa y baja superficie expuesta al viento. El primer y tercer tramo de la torre son de sección transversal cuadrada. Utilizando tubo estructural cuadrado para la construcción del primer caso y hierro ángulo para el tercero. Mientras que el segundo tramo presenta una sección transversal variable de transición entre el primer y último tramo, construido con hierro ángulo con cordones reforzados.

La torre se apoya en una estructura metálica denominada "pie metálico", conformada con perfiles laminados en caliente y fija mediante anclajes a una base de hormigón armado. El eje de rotación de la torre se vincula al pie mediante un conjunto de rodamientos que permiten la acción retráctil de la torre.

#### 3.2. Funcionamiento

La retracción de la torre se logra mediante unos contrapesos de desequilibrio, los cuales generan una fuerza excéntrica al eje de rotación de la torre.

Para mantener el equilibrio del sistema en el estado de lanzamiento, se vincula la torre, mediante un cable de acero, a un dispositivo de liberación ubicado en la base del cohete. Al iniciar el vehículo su movimiento ascendente, se acciona el dispositivo de lanzamiento y se libera la torre. Luego, el frenado se logra mediante un sistema de frenos previamente presurizado. En la configuración de supervivencia, el grado de libertad de rotación de la torre alrededor de su eje se suprime mediante unas ménsulas de sujeción que generan un vínculo rígido entre torre y el pie metálico.

En la Figura 1 se presenta una ilustración del conjunto de la torre retráctil en su configuración lanzamiento y en la Figura 2 se observa la vinculación de la torre en su configuración supervivencia.

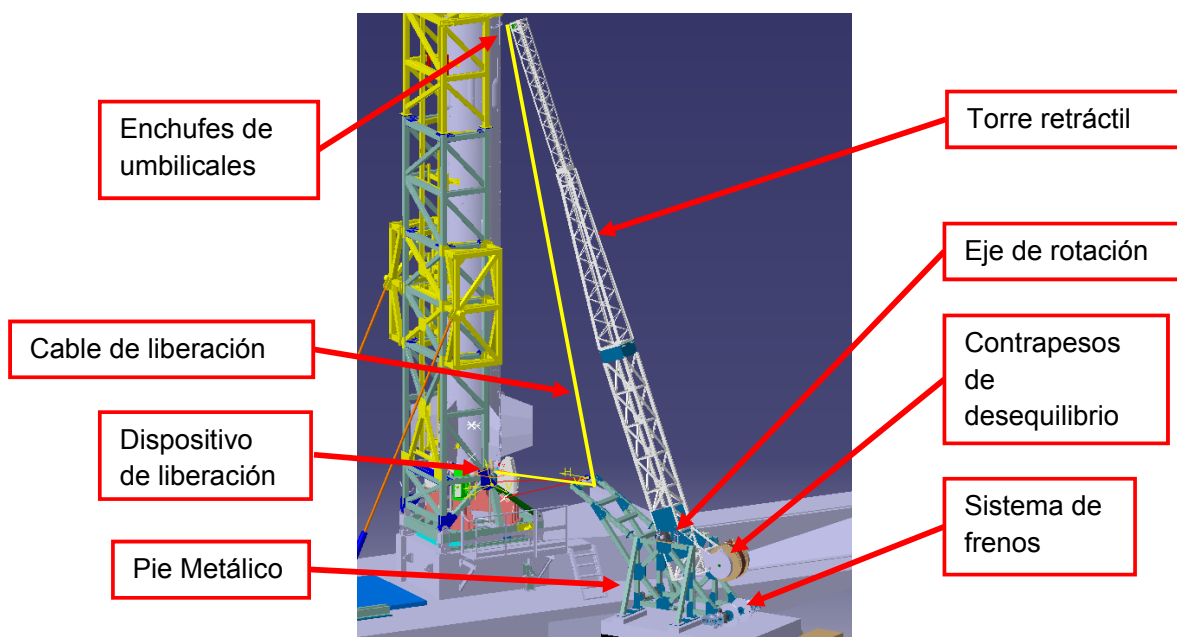


Figura 1. Conjunto de torre retráctil en configuración lanzamiento.

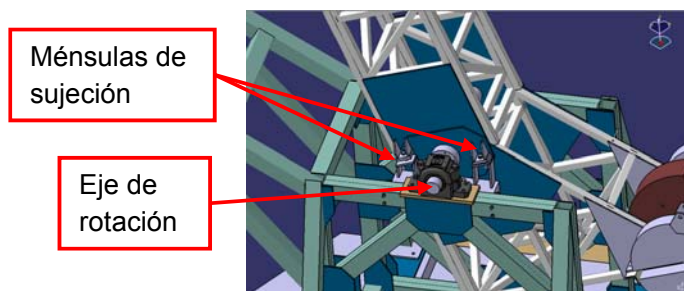


Figura 2. Vinculación de la torre en configuración supervivencia.

#### 4. ANALISIS ESTRUCTURAL

##### 4.1. Normativa de aplicación

- Cargas actuantes: CIRSOC 102-05 Acción del Viento en las Construcciones.
- Verificación estructural: ANSI/AISC 360-10 (Método ASD).

##### 4.2. Determinación de las cargas actuantes

La torre debe tener la capacidad de soportar las cargas debidas a la acción del viento, los esfuerzos dinámicos y las cargas gravitatorias. A continuación se presentan los lineamientos establecidos para determinar las diferentes cargas actuantes.

Los modelos dinámicos y estáticos se realizan con el software ABAQUS.

##### 4.2.1. Cargas gravitatorias

Las cargas de peso propio se contabilizan en el propio modelo.

##### 4.2.2. Acción del viento

En el estado supervivencia, la torre se comporta como una construcción fija. Por lo tanto, las cargas de viento se evalúan de acuerdo a la norma CIRSOC 102-05 "Acción del Viento Sobre las Construcciones", contemplando los parámetros de diseño de acuerdo a la zona de emplazamiento.

Siguiendo el procedimiento descrito en dicha norma, se establecen las cargas actuantes. Luego, considerando las posibles direcciones de actuación de las mismas, se definen tres estados de carga para realizar los análisis, con el agregado de un análisis de frecuencia para verificar el encuadre en lo que la norma CIRSOC 102-05 define en su Cap.2 como estructuras rígidas, esto es con una frecuencia natural igual o mayor que 1 Hz.

- Estado 0: Frecuencia natural.
- Estado de carga 1: Peso propio (D) + Vto dirección transversal (WT).
- Estado de carga 2: Peso propio (D) + Vto dirección longitudinal negativa (WL(-)).
- Estado de carga 3: Peso propio (D)+Vto dirección longitudinal positiva (WL(+)).



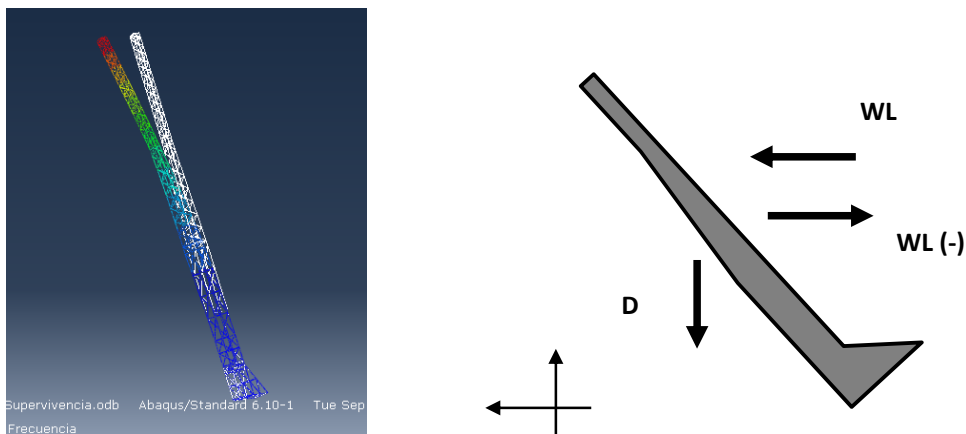


Figura 3. Frecuencia natural y estados de carga.

#### 4.2.3. Cargas dinámicas

Para establecer estas cargas, se evalúa la dinámica de la torre haciendo uso de un modelo dinámico en base al mismo modelo estructural que se utiliza para los cálculos de la torre solicitada por las cargas de viento.

En el modelo, al liberar la torre y producto del efecto de la gravedad sobre los contrapesos, se logra simular la acción retráctil. Como parámetro de referencia se agregó la envolvente de seguridad y el cohete en forma esquemática, a este último se le imprime la aceleración correspondiente, referenciando el movimiento relativo de la torre al vehículo. En la Figura 4 se visualiza la cinemática de la torre y del cohete para tres instantes de tiempo. El primero representa el momento de liberación de la torre, el segundo el inicio de la acción de frenado y el tercero la torre frenada totalmente.

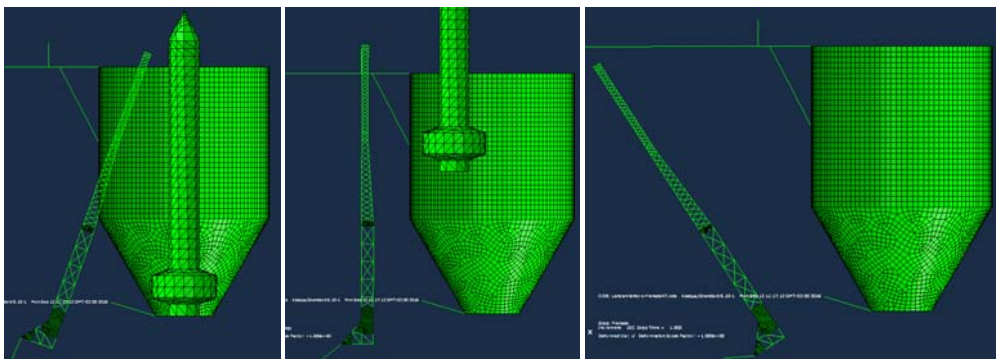


Figura 4. Cinemática de la torre retráctil.

En la Figura 5 se muestra el desplazamiento horizontal de tres puntos analizados en función del tiempo. En este gráfico se puede apreciar que por más que la posición horizontal del “vértice de la aleta” y de la “punta de la torre” coinciden, una vez que comienza el movimiento del cohete y de la torre, estos puntos no se cruzan. Se puede concluir que no hay riesgo que el cohete impacte la punta de la torre. En esta figura también se puede apreciar que la aleta sale de la envolvente a los 2,25 segundos.

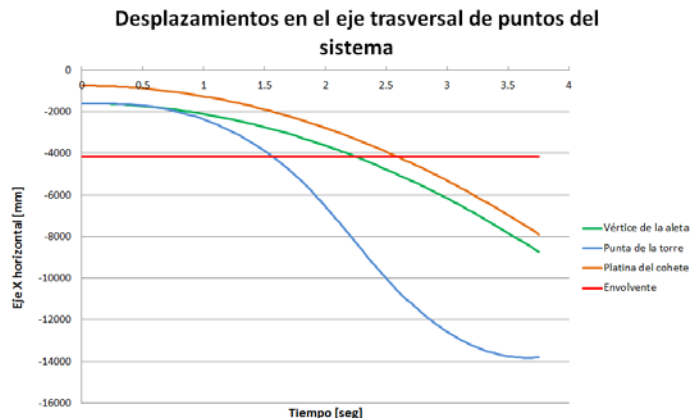


Figura 5. Desplazamiento horizontal de los puntos analizados en función del tiempo.

En la Figura 6 se muestra gráficamente la trayectoria de los tres puntos en análisis representados en el plano. Para poder apreciar la variación de la posición en función del tiempo, se divide la trayectoria de cada punto en dos tramos, el primero desde tiempo cero, coincidente con el comienzo del movimiento del cohete (lanzamiento), hasta los 2,43 segundos. En este instante la trayectoria del vértice de la aleta del cohete alcanza la altura correspondiente a la ubicación de la punta de la torre para  $t=0$ . El segundo tramo va desde los 2,43 segundos hasta la detención de la torre a los 3,75 segundos. De esta manera para el mismo valor de tiempo (2,43 seg.) se puede apreciar la ubicación de los tres puntos en análisis y ver que no hay riesgo que el cohete impacte la torre.

**Desplazamientos en el plano vertical y trasversal de puntos del sistema**

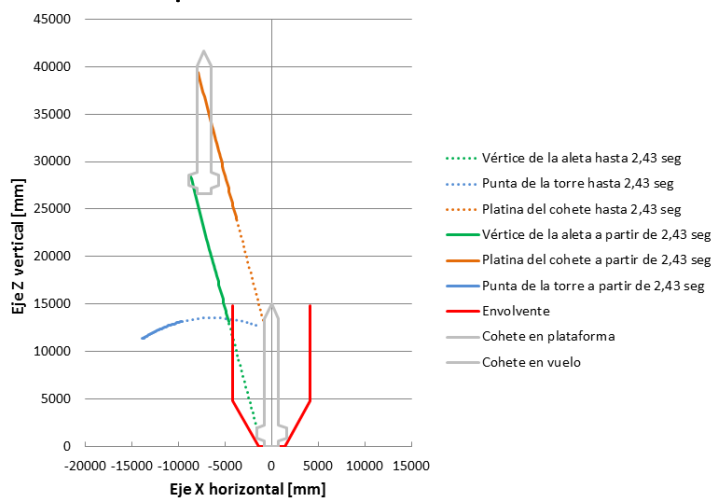


Figura 6. Trayectorias de los puntos del cohete y de la torre durante el despegue.

En base a la cinemática de la torre y a la masa de los elementos que la componen se obtienen los esfuerzos que soporta cada segmento de la estructura. Para estimar las tensiones sobre cada componente se utiliza el modelo construido en ABAQUS, que por ser del tipo dinámico arroja valores de tensiones para cada posición en función del tiempo. Por lo tanto, para determinar los valores extremos se debe analizar toda la secuencia de movimiento de la estructura. En virtud de esto, se puede comprobar que la condición más desfavorable es cuando la torre comienza a desacelerarse por causa del sistema de frenado. En la Figura 7 se observa el instante de los máximos esfuerzos en la estructura.

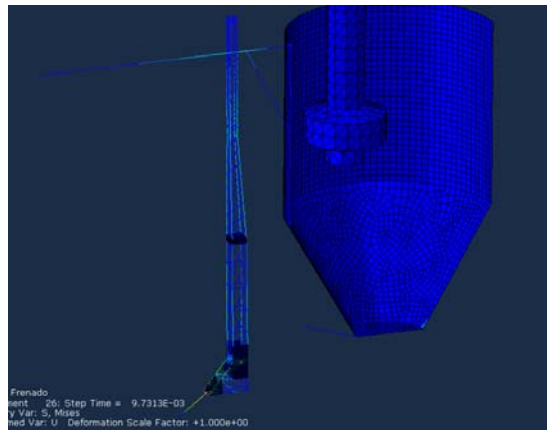


Figura 7. Máximos esfuerzos dinámicos.

En la Figura 8 se aprecia un detalle de las zonas de la torre que soportan los mayores valores de tensión. Estas zonas se corresponden con la porción de la torre donde se aplica la fuerza de frenado y se ubican los contrapesos. A consecuencia de los valores de tensiones predominantes en esta zona, se vio la necesidad de colocarle unas placas de refuerzo a la torre, que contribuyen a rigidizar la zona y distribuir las cargas en forma pareja.

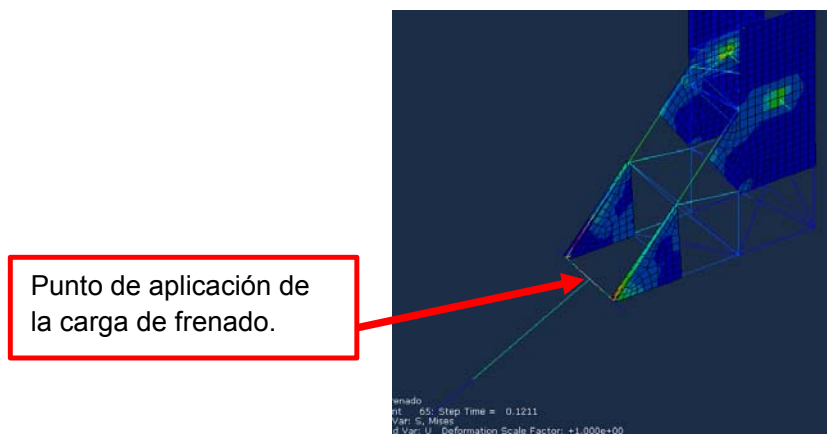


Figura 8. Detalle de las tensiones en la cercanía del eje de contrapesos.

## 5. CONCLUSIONES

La estructura de la torre retráctil sufre las mayores cargas en su configuración lanzamiento, más precisamente al momento de iniciarse el frenado. Es por ello que su diseño final contempla refuerzos y consideraciones de operación para minimizar las tensiones estructurales.

La solución a las especificaciones de diseño que brinda el accionamiento con contrapesos de desbalanceo, el dispositivo mecánico de liberación y uso de frenos pre-presurizados, es satisfactoria ya que cumple con la cinemática requerida y con el funcionamiento autónomo de la torre retráctil.

## DESARROLLO DE PROTESIS ORTOPEDICAS EN MATERIALES COMPUESTOS PARA USO COMPETITIVO

J. I. Villar<sup>a</sup>, M. Fontana<sup>a</sup>, L. Sznajderman<sup>a</sup>, S. Antokoletz<sup>a</sup>

*Dpto. Aeronáutica., Facultad de Ingeniería, UNLP, Calle 116 e/ 47 y 48 - (1900) La Plata*

Trabajo presentado en: EUDII 31 [http://www.icesi.edu.co/ingenieria\\_industrial/eudii31/es/](http://www.icesi.edu.co/ingenieria_industrial/eudii31/es/)  
(Oct. 2016)-CAIA 4 (Nov. 2016)

### INTRODUCCIÓN

El trabajo describe el diseño, construcción y posterior validación de una prótesis transtibial de uso competitivo destinada a carreras de velocidad. La misma es concebida en materiales compuestos y las bases del diseño contemplan la medición de parámetros biomecánicos del usuario para un posterior análisis de similaridad.

Las principales características que se pretende lograr de una prótesis tipo 'Flex- Foot' son la respuesta elástica lineal, tamaño y proporción apropiada, frecuencia natural alejada de la frecuencia de pasos del atleta, y que deba soportar la carga dinámica y fatiga proporcionada por el corredor.

La respuesta proporcional responde a un modelo de "resorte lineal simplificado" al cual se ajusta el comportamiento de la pieza, en donde las capas de fibra de carbono garantizan que el desvío de la parte anterior del pie, desde la estancia intermedia al extremo del dedo, sea proporcional al peso del usuario y al nivel de impacto. La ventaja es la reducción del cansancio mediante una carrera energéticamente eficiente y fluida.

La progresión tibial activa es otra característica que debe presentar la prótesis y es inherente a la forma de la misma. Dicha característica hace que, al mismo tiempo que el trabajo producido por las fuerzas verticales aplicadas durante la toma de contacto y consecuente compresión que se almacena como energía potencial elástica de deformación de la pieza para luego traducirlas en energía cinética de corredor, también ocurrirá una precarga de la pieza que actúa como resorte torsional debido a su particular forma y responderá análogamente al tobillo de un pierna sana favoreciendo el avance de la tibia rotando alrededor del punto de apoyo. El movimiento lineal descrito como progresión tibial activa desde que el pie está apoyado por completo hasta el momento de su despegue del suelo produce el avance de la pieza rotando alrededor del punto de contacto, cual si se tratase de una articulación reduciendo la necesidad de empujar el cuerpo hacia delante respondiendo como un resorte torsional que mediante el pie contralateral provoca un momento restitutivo en el punto de contacto con el efecto descrito. La longitud de 'quilla' de carbono completa indeformada debe coincidir con la longitud del pie sano en condición de elongación máxima de carrera, lo que aporta una marcha más suave y natural, da soporte al amputado y previene que la longitud de los pasos sea desigual o que se cargue excesivamente el talón del miembro sano en el contacto con el suelo, generando estabilidad y seguridad en la fase de apoyo.

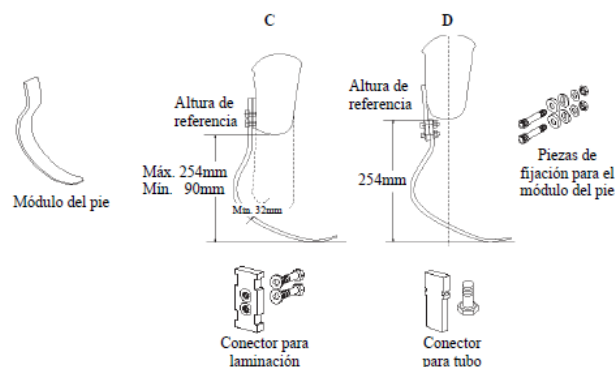


Figura 1: partes de una prótesis Flex-FootCheetah®

Se toma en cuenta como punto de partida la alineación estática mientras que la alineación definitiva se obtiene únicamente tras haber concluido la comprobación dinámica. La flexión adecuada del encaje se determina según las necesidades del usuario. En el plano frontal se coloca el encaje en la posición adecuada de abducción utilizando un alineador y se debe dar de  $5^\circ$  a  $7^\circ$  de rotación externa adicional. Se establece la altura adecuada de la prótesis con el zapato puesto, aumentado esta en 0.25m con respecto a la del lado sano, para compensar la compresión vertical y la flexión plantar. Existen varias configuraciones posibles una prótesis del tipo flex, y se define una forma a emplear dado que en sí, la forma de la pieza y la orientación y cantidad de láminas a utilizar definen un problema abierto con infinitas combinaciones posibles que se deben acotar, dependiendo del objetivo que se busque. En este caso se ha optado un perfil J muy utilizado en carreras de velocidad. Una vez elegida la forma se precisa el material y cantidad de láminas a utilizar junto con su orientación para, con ayuda del software de elementos finitos, dejar definido el laminado, construir la pieza y ensayar la misma.

## PARTE EXPERIMENTAL METODOLOGÍA

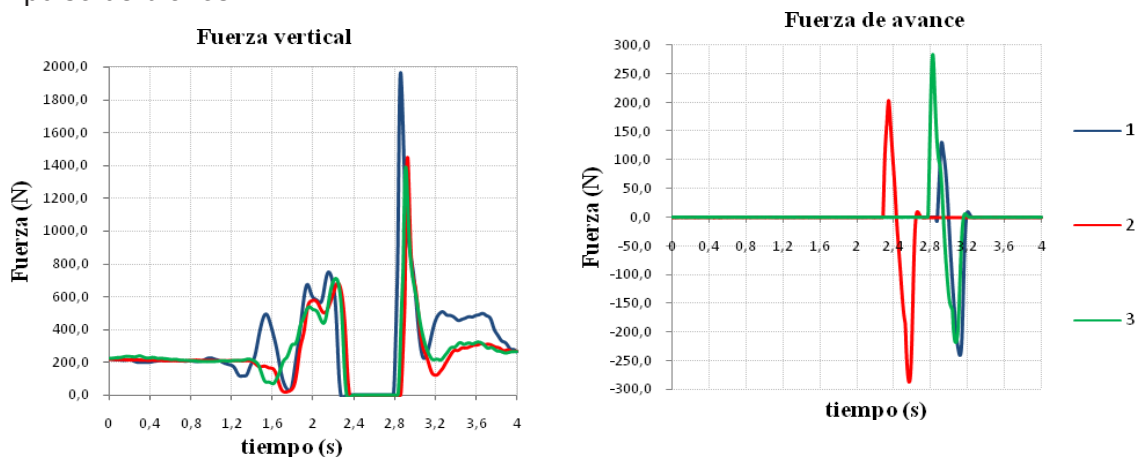
### Metodología

El procedimiento elaborado para poder determinar la forma de prótesis a construir se centra en un análisis de similaridad biomecánica del atleta comparando el miembro sano con el afectado a través de una batería de ensayos y análisis de somatotipo y antropometría, cuyos datos puedan alimentar el modelo de elementos finitos de una pieza desarrollada para resistir las exigencias de competencia, que trabaje en régimen lineal y sea capaz de restituir en movimiento, a través de un incremento en la energía cinética del trabajo de deformación aplicado a la misma durante la toma de contacto y carga. Posteriormente se construye y evalúa la pieza resultante de modo que corrobore los modelos implementados y satisfaga los requerimientos impuestos.

### Evaluación biomecánica y Análisis de mediciones

Entre los participantes de la evaluación, se proponen una batería de saltos (en caso de no poder ejecutarlos la evaluación se realiza en un atleta convencional de somatotipo equivalente). Mediante el empleo de una plataforma de fuerzas que censa con una frecuencia de 1000 muestras por segundo y mide en los tres ejes espaciales las magnitudes de desplazamiento, fuerzas y momentos, se registra la actividad del usuario en cada uno de los saltos. De esta manera se busca la fuerza máxima que es capaz de ejercer. Dado que el estudio en la plataforma de fuerza no emula el paso de la carrera propiamente dicho, se valida el mismo realizando un estudio cinemático de la carrera en el programa de software libre "Kinovea" para analizar distintos puntos de contacto y fuerzas puestas en juego tanto en articulaciones como en reacciones al piso. Obtenidos los resultados del laboratorio de biomecánica, se procede a efectuar un análisis de las fuerzas involucradas en cada salto,

para luego realizar las hipótesis necesarias con el fin de resumir todos los valores en una sola carga que servirá de "input" al modelo en el programa de elementos finitos. Se debe mencionar que existen dos fuerzas principales: la fuerza vertical (denominada  $F_z$ ) y la de avance (denominada  $F_y$ ), se descarta la fuerza en el sentido perpendicular (transversal al movimiento) a los dos pies (en los resultados esta fuerza se manifiesta sobre el eje "x"). Dichos valores se obtienen de los saltos denominados "Avalakov" y "longitudinal con impulso de brazos".



**Figura 2:** Izq: Fuerza vertical ( $F_z$ ) vs tiempo. Der: Fuerza de avance ( $F_y$ ) vs. tiempo.

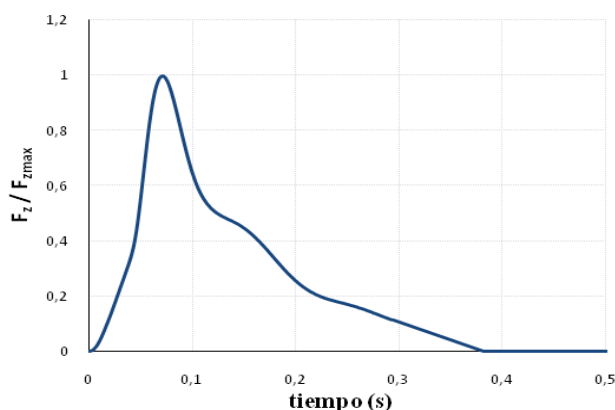
De la figura 2, queda determinada la fuerza  $F_z$  máxima como el pico alcanzado en el segundo salto. En cuanto a la fuerza de avance, fue tomado el valor más representativo de la fuerza puesta en juego durante la batería de saltos. A continuación se presentan generalizados los valores combinados de estas dos fuerzas, es decir, el módulo de ambas y el ángulo con la horizontal, que resulta ser el ángulo estimativo de inclinación del anclaje de la prótesis respecto al cono.

$F_{max}$	
$F_z$	1450 N
$F_y$	300 N
$F_{max}$ (módulo)	1480 N
$\theta$	$78^\circ$

**Tabla 1:** Fuerzas definitivas

Además, para la posterior validación del modelo en forma dinámica, en base a los resultados de los saltos se construyó la siguiente curva que tiene en cuenta la fuerza vertical y representa cómo varía la carga en función del tiempo mientras el usuario se afirma al suelo y luego deja de pisar. La curva esta parametrizada en función a la carga máxima antes obtenida.





**Figura 3:** Variación del módulo de la fuerza en dirección vertical vs tiempo de aplicación

La fuerza estudiada tiene un tiempo de aplicación de 0.383 segundos. Para ver claramente el comportamiento se colocó un tiempo de cálculo del doble (0.766 segundos) con un valor de fuerza, en ese intervalo final, igual a cero. De manera que se verá cómo oscila la prótesis en ese tiempo.

Estas fuerzas no solo permiten determinar las *Ground Reaction Forces* (GRF) o fuerzas transmitidas al piso, sino que además, al tener su variación temporal, se pueden hallar las aceleraciones y velocidades de los puntos de toma de contacto determinando así tanto la potencia puesta en juego como la energía acumulada en la deformación.

### Características del modelo en Elementos Finitos

Halladas las fuerzas puestas en juego, definida la respuesta esperada, los desplazamientos máximos permitidos, longitud, peso, GRF y energía acumulada, queda pendiente la definición del laminado y la forma en que se conectan el punto de anclaje de la prótesis y el piso. Como se mencionó previamente, se optó por definir un perfil tipo J (el más utilizado en carreras de velocidad) para luego optimizar la prótesis trabajando sobre la conformación del laminado.

Para un primer análisis de resistencia se utilizó un factor de carga de 1,5 y se determinó el índice de falla en el laminado en condiciones cuasi estáticas mediante el criterio de tensión máxima. Posteriormente se realiza un estudio dinámico para obtener las frecuencias naturales propias de la pieza con las frecuencias de la carga como forzante.

Propiedad	Unidades	Fibra de carbono unidireccional	Tejido plain de carbono	Núcleo de espuma de poliuretano
Densidad	kg/m <sup>3</sup>	1600	1600	65
E <sub>1</sub>	Gpa	98.26	46.1	
E <sub>2</sub>	Gpa	6.97	47.2	
$\nu_{12}$		0.3	0.06	
G <sub>12</sub>	Gpa	3.65	3.35	
F <sub>1T</sub>	MPa	1198.79	615.2	
F <sub>2T</sub>	MPa	48.73	556.7	
F <sub>1C</sub>	MPa	601.29	441.8	
F <sub>2C</sub>	MPa	153.86	491.5	
F <sub>6</sub>	MPa	67.51	133.4	
E	MPa			44.5
$\nu$				0.3

**Tabla 2:** propiedades de los materiales utilizados en el modelo

### Análisis estático

Mediante el empleo de un software de elementos finitos, se evaluaron distintos modelos siendo la limitación el máximo desplazamiento obtenido en el extremo de la pieza, el criterio utilizado para definir el laminado a fin de evitar posibles contactos con el cono debida la condición de amputación de uno de los usuarios.

La geometría de la prótesis se define en base a la posición natural del pie apoyado en punta, es decir, en forma de pie equino. Para el análisis estático se tiene en cuenta una situación de carga en forma vertical y de compresión, correspondiente a los resultados de la evaluación biomecánica, la cual es aplicada a la altura de las falanges, emulando a la fase de despegue, como fase de mayor fuerza de reacción presente en la carrera.

Se realizaron varias configuraciones de laminados variando la cantidad de láminas y el espesor del núcleo (incluso variable por zonas). Así fue que se obtuvo un laminado simétrico conformado por láminas de carbono bidireccional y unidireccional, con un índice de falla de 0.2 y un desplazamiento máximo de 5,88cm en el extremo. El laminado resultante cuenta con 26 láminas y un núcleo de espesor variable apilados de la siguiente forma:  $[0_2^{BD}, 0_{11}^{UD}, N]_s$ .

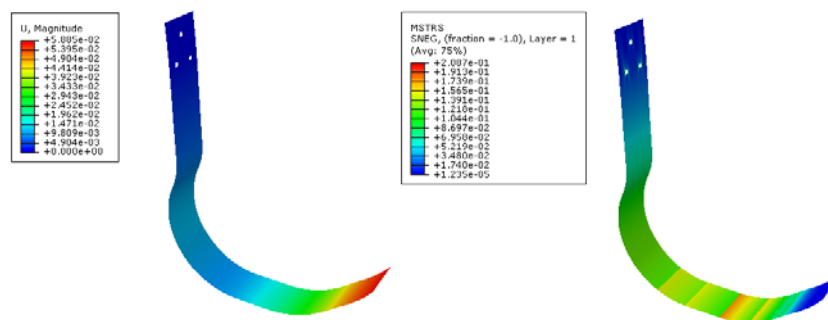


Figura 5: desplazamiento e índice de falla del modelo final

También se estimó la energía elástica involucrada para ese desplazamiento calculando la integral de la fuerza por su desplazamiento. De esta forma, si para una fuerza de 1450N se produce un desplazamiento de 5.88cm, la energía puesta en juego durante la carga resulta de 88J. Tras el cálculo estático, se procede a calcular las frecuencias naturales de la pieza obviando el primer modo dado que se trata de un modo torsional de baja frecuencia. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Frecuencias naturales	
1º modo	53.9 Hz
2º modo	97 Hz
3º modo	130 Hz

Tabla 3: valores de los primeros modos

### Fabricación de la prótesis

#### Molde

Definida la pieza que responde a las características relevadas se procede a la fabricación de la prótesis. Dado que la geometría fue impuesta por los modelos más habituales para carreras de velocidad, se procedió a cortar costillas con la forma del perfil de la prótesis para conformar el molde.

## Materiales y proceso de fabricación

Se construye la pieza con los materiales mencionados en la conformación del modelo de elementos finitos, buscando comparar los resultados obtenidos con los modelos comerciales y las performances alcanzadas por sus usuarios. El proceso de fabricación elegido fue una laminación manual con vacío en el cual se apilaron las telas sobre el molde (según la secuencia de laminación definida) y se impregnaron con la resina epoxy. Cuando se completa la secuencia de laminación se coloca sobre la preforma un film perforado, un *bleeder* (material absorbente) y una bolsa de vacío que sella contra el molde con el objetivo de extraer todos los excesos de resina que puedan quedar, permitiendo alcanzar mayores fracciones volumétricas de fibras que repercutan en un material más eficiente. El vacío se realiza durante 5 horas aproximadamente, dejando la pieza durante 3 días para el curado.

## VALIDACIÓN

La validación consiste en realizar diversas ratificaciones experimentales que demuestren una correlación entre los cálculos previos realizados a partir de un modelo y las hipótesis realizadas que cumpliera los requerimientos necesarios para suplir la falta de prótesis en el atleta, contrastándola con lo que realmente soporta o las características reales que la misma presenta.

## Ensayo de compresión

Se verifica la fuerza aplicada versus desplazamiento, utilizando una Máquina Universal de Ensayos INSTRON®, para comparar con lo calculado en el programa de elementos finitos, realizando dos ensayos iguales de carga y otro de descarga buscando reducir los errores y garantizar repetitividad en el ensayo. Las medidas de desplazamiento se toman con un comparador "Mitutoyo", de un rango de 0 a 10mm, y con una resolución de 0,01mm. Vale decir, que si bien es un instrumento de extrema precisión, limita el máximo desplazamiento a 10mm, lo cual debería encontrarse dentro del rango esperado. Se toman medidas por cada vuelta del comparador, de manera que cada una representa un desplazamiento de 1mm. En cuanto a la medición de la carga aplicada, se utiliza una celda de carga de 500 Kgf, cuya señal es recibida por un tester "Agilent" U12423conectado a un acondicionador de señal "Micro-Measurement" modelo "Vishay". El punto de aplicación de la carga se define a 1,5cm de la punta de pala, lugar que se estima como punto de toma de contacto con el piso durante la carrera y se realiza la primera carrera con control manual a la mínima velocidad posible (0.5cm/min). Posteriormente se realiza la segunda carrera con carga de modo automático a una velocidad de 5cm/min.

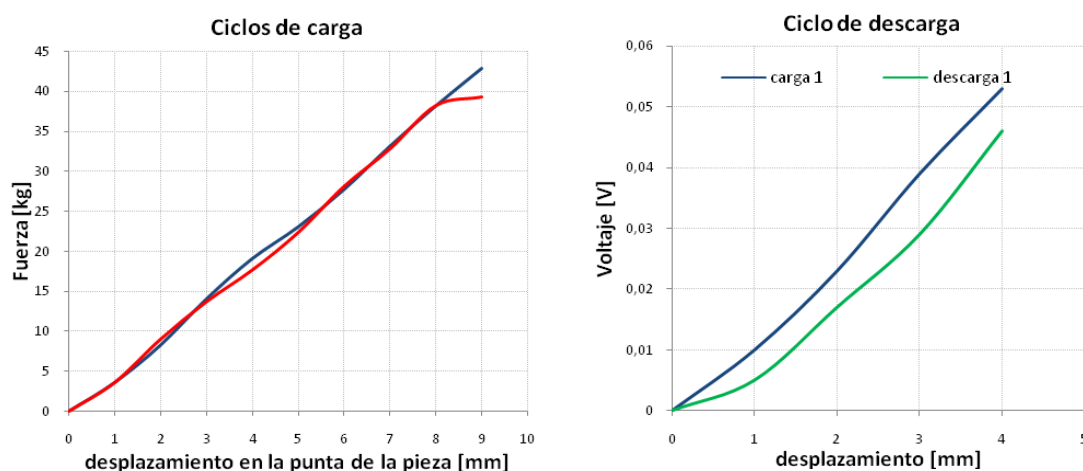


Figura 7: resultados del ensayo mecánico

Como se observa el comportamiento en el ensayo es bien lineal lo cual permite calcular la rigidez del conjunto y así contar con un parámetro de diseño posterior.

Otro parámetro de importancia es la energía absorbida por la pieza, ( $E$ ) que se obtiene mediante el cálculo del área bajo la curva. De esta manera, siendo  $U$  energía elástica almacenada macroscópica,  $F_n$ = Fuerza aplicada, y  $\delta$ = desplazamiento nos queda:

$$E = \int F_n * d\delta = \frac{1}{2} K_n \delta^2 \quad (1)$$

$$K_n = \frac{F_n}{\delta} \quad (2)$$

Donde  $K_n$  resulta ser la constante elástica en dirección de aplicación de la carga para la pieza. Esta energía tiene una correlación con el trabajo realizado por las fuerzas de contacto en dirección del desplazamiento  $F_n$  en punto de aplicación de la carga y que debe corresponderse con la energía de deformación elástica acumulada en la pieza que podremos relevar mediante el modelo FEM, en el cual la energía interna acumulada por el mismo efecto deberá estar dada por la relación:

$$U = \frac{1}{2} \epsilon \cdot C \epsilon \approx \frac{1}{2} K_n \delta^2 \quad (3)$$

Donde,  $U$  representa la energía de deformación elástica acumulada, mientras que  $\epsilon$  resulta ser la deformación elástica macroscópica del material y  $K_n$  el tensor elasticidad macroscópico resultante para la pieza y con el laminado considerado.

Si decimos que tiene un comportamiento prácticamente lineal, la integral se reduce a calcular el área de un triángulo, donde se extrapola la curva del ensayo realizado para permitir una comparación con el modelo de elementos finitos. Esto da como resultado que para una carga de 150Kg se corresponde un desplazamiento de 34.37mm, lo cual se traduce en una energía elástica de 50J.

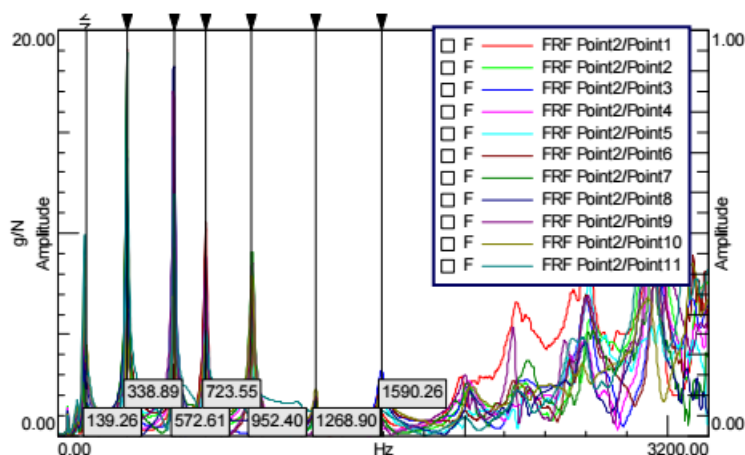
Vale destacar la mayor rigidez que presenta (suponiendo este comportamiento lineal) el modelo fabricado en comparación con el calculado mediante elementos finitos, donde se obtuvo un desplazamiento de 58.8mm para una carga de 150Kg.

### Frecuencias naturales

Para verificar los modos de la frecuencia natural de la pieza se utilizó un martillo modal modelo "Modal Hammer 2302-100". Además del martillo, se utilizaron una placa LMS "test lab" como amplificador de señal y un acelerómetro ubicado en el punto de apoyo de la prótesis en la carrera.

El ensayo consistió en percutir la pieza 5 veces en cada tramo, para lo cual se dividió la longitud de la pieza en 10 estaciones de manera de realizar los golpes secuencialmente y asegurando distintos muestreos. De esos 5 golpes, la computadora toma el promedio, de manera que en las curvas se repitan los 10 golpes, más un repetido.

A continuación, se presentan los resultados de las amplitudes vs frecuencia, de manera que se pueden observar los valores para ambos en cada modo.



**Figura 8:** gráfico amplitud vs.frecuencia

En la gráfica anterior se pueden apreciar claramente los 7 primeros modos, no obstante nos quedamos con los primeros 3 para poder comparar así con los resultados obtenidos mediante modelo y verificar la lejanía de éstos valores con la frecuencia de pasos del usuario.

Para concluir el análisis de frecuencias, se presenta la siguiente tabla, en donde se comparan las frecuencias mencionadas previamente.

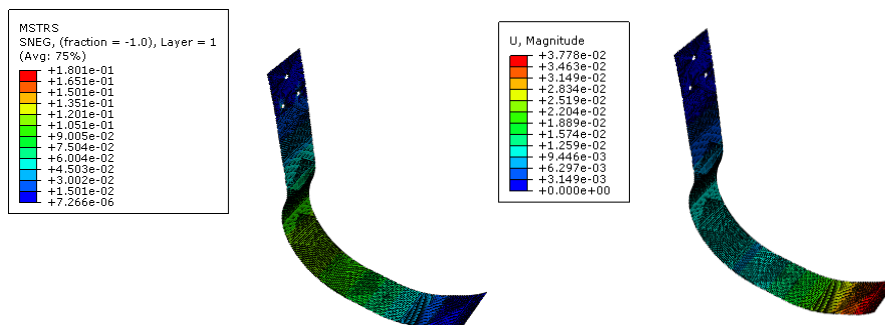
		Frecuencia [Hz]		
Usuario	Pasos/seg	modos	FEM	Ensayo
Aceleración	0,53	1°	53	139,26
Máx.vel.	0,4	2°	97	338,89
		3°	130	572,61

**Tabla 4:** comparación valores de frecuencias naturales

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Realimentación del modelo

A la luz de los resultados obtenidos y de las diferencias encontradas, sobre todo entre las frecuencias naturales del modelo y el ensayo, se modificaron los espesores de las láminas definidos en el modelo. El espesor utilizado en los modelos anteriores se definió en 0.18mm para cada lámina. Si cada facing del laminado está conformado por 13 láminas, el espesor total del mismo debería alcanzar los 2.3mm. Dicho espesor no coincide con el obtenido mediante el proceso de fabricación adoptado el cual alcanza los 2.8mm en promedio, un valor aproximadamente 20% mayor, lo que se traduce en un espesor de lámina de unos 0.21mm cada una. Además se reajustaron los espesores del núcleo y sus zonas de incumbencia por el mismo motivo.



**Figura 9:** resultados de índice de falla (izq.) y desplazamiento (der.)

Parámetro	Magnitud
Desplazamiento máximo	3,77 cm
Máximo índice de falla	0.18
Energía de deformación acumulada	45 joules
Rigidez lineal	39787 N/m

**Tabla 5:** valores obtenidos del nuevo modelo

### Comparación modelos y ensayo

Tras haber realizado el rediseño, se procedió a comparar los resultados mencionados en la sección anterior. A continuación se presenta la siguiente tabla, en donde se pueden comparar sintéticamente los resultados.

	Modelo 1	Modelo 2	Real	Real vs modelo1 [%]	Real vs modelo2 [%]
Desplazamiento [cm]	5,88	3,77	3,43	42	9
Rigidez [n/m]	24500	39800	43600	44	9
Energía J	53	47	50	6	6
Frecuencia 1° modo	53	52,87	139,26		
Frecuencia 2° modo	97	101,00	338,89		
Frecuencia 3° modo	129	132,00	572,61		

**Tabla 6:** comparación de resultados característicos en el rediseño

Puede observarse de la tabla, que el 2º modelo se acerca a los valores reales en el desplazamiento, y rigidez, estimándose un error menor al 10%, mientras que la energía se mantiene razonablemente similar a los valores reales en ambos modelos. Los valores de los primeros modos de frecuencia calculados en el software se encuentran alejados de los obtenidos en el ensayo lo cual forzó a adelantar el estudio de la respuesta dinámica. Los valores de rigidez macroscópica en dirección de aplicación de la carga son similares a los relevados por Bruggemann [1] y se encuentran dentro de los valores de la piezas comerciales.



## ACOPLE DE PIEZAS TRANSMISORAS DE CARGA

A fin de poder evaluar en uso la pieza fabricada se estudió la problemática de la interfaz que vincula la prótesis propiamente dicha con el cono de fijación o bota a través de un 'FixingBracket'.

El mismo no solo tiene que ser una vinculación práctica entre la bota y la prótesis sino que también deberá resistir la carga aplicada por el usuario. La forma del mismo tiene que darle la correcta alineación a la prótesis de manera que sea cómoda y confortable posible para el usuario al mismo tiempo que garantice un punto de contacto con el suelo similar al estimado en los modelos y el ensayo. Asimismo, esta pieza define también la alineación entre el muñón y la punta de la pala, punto muy importante a la hora de la evolución del usuario durante la carrera.

La pieza final fue pensada para ser construida en aluminio y se verificó mediante un modelo de elementos finitos que las tensiones máximas para la carga impuesta no superen la tensión admisible del material. Por cuestiones prácticas y de velocidad de fabricación las primeras pruebas geométricas fueron realizadas mediante impresión 3D y se evalúa la posibilidad de reemplazar la pieza de aluminio por la impresión 3D definitivamente dependiendo de que la misma no afecte la performance ni ponga en riesgo la salud del usuario.

A partir de las fuerzas calculadas en el estudio biomecánico, se pudo observar que el ángulo óptimo entre la bota y la pala es de  $15^\circ$ , aproximadamente. Este cálculo del ángulo "óptimo" se realizó mediante la composición de las dos fuerzas puestas en juego durante la carrera, como se manifestó anteriormente.

Para su diseño geométrico se definió que el ancho del acople coincida con el de la pala y se determinaron 3 agujeros de fijación. Esto responde a la necesidad de generar un plano regulable que permita corregir pequeñas desalineaciones mediante el suplemento de los distintos tornillos de fijación. De esta manera, se modela una carga que se distribuye entre los tres agujeros uniformemente como una presión en la mitad superior del agujero. Se supone además que los dos agujeros inferiores toman 40% de la carga cada uno y el superior solo un 20%. Con estas consideraciones, se realizó su estudio mediante software FEM arrojando los siguientes resultados:

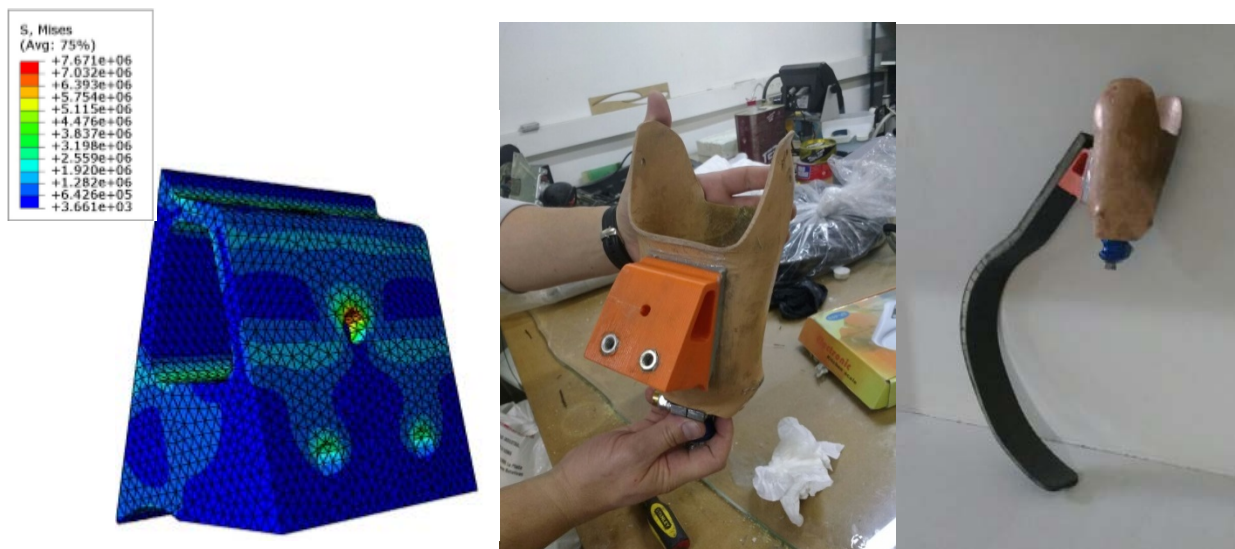
Como puede verse en la figura, se registran zonas de la pieza que no están solicitadas, de manera que se puede prescindir de dichas partes sin comprometer el funcionamiento de la misma y de esa manera optimizarla. Además, se puede ver que la zona de mayor carga se encuentra en la parte del agujero superior. Este efecto resulta por tener menos área de contacto para repartir la carga. A pesar de tener la carga más alta de la estructura se ve que las tensiones de Von Mises no superan la tensión de fluencia del material, tomada como admisible. Cabe aclarar que el modelo se supuso en aluminio para las primeras consideraciones. Se puede observar que el resto de la estructura presenta amplios márgenes de seguridad en cuanto a tensiones se refiere, por lo cual se procede a aplicar las consideraciones al modelo.

Removiendo material se redujo el peso considerablemente, punto importante ya que la prótesis no debe pesar más que el miembro faltante del atleta, lo cual llevaría a un desbalanceo en la carrera. Como se destacó anteriormente se llevó a cabo una impresión 3D del anclaje con el fin de evaluar su posicionamiento en el cono y la posición relativa de la prótesis. En conjunto con el atleta se definen las posibles correcciones a realizar.

En este proceso se detectaron dos aspectos a destacar: en primer lugar, el ángulo entre la bota y la pala no fue lo suficientemente grande. Se suplementó la prótesis hasta que el usuario se sintiera a gusto. El ángulo de sujeción con la vertical pasó de  $15^\circ$  a  $27^\circ$ . Esto modifica la distancia entre el muñón y la punta de la pala ya que se busca que el muñón apunte a la punta de la pala. Mediante otro modelo puede observarse que la pieza no supera las tensiones máximas admisibles. Nuevamente la parte del agujero superior es la más solicitada.

## ENSAMBLADO FINAL Y PRUEBA DE CAMPO

Con las modificaciones propuestas en el modelo se confeccionó la nueva pieza en impresora 3D para poder realizar una nueva prueba con el usuario, pegando las tuercas dentro de los agujeros para luego afirmar la prótesis y luego se adhirió el anclaje a la bota con pegamento Spabond 340. Se dejó curar el conjunto los tiempos establecidos por el fabricante para poder realizar la prueba de campo con el atleta.



**Figura 18:** distribución de tensiones en final y pegado del anclaje. Conjunto terminado

La prueba con el usuario se llevó a cabo en el Centro Nacional de Alto Rendimiento Deportivo (CeNARD). La misma consistió en varios ensayos para poder medir la resistencia del prototipo. De esta manera se le solicitó al usuario que fuera incrementando la carga hasta la máxima que pudiera aplicar para verificar la resistencia de todas las partes involucradas. Realizada la prueba mediante una inspección visual se observó que el núcleo en la parte interior de la prótesis, se despegó del laminado de carbono. De esta manera, las láminas trabajando a compresión en la parte interna de la prótesis dejaron de trabajar conjuntamente con el núcleo, el conjunto dejó de comportarse como un laminado sándwich perdiendo el “facing” su estabilidad. De esta manera se observa un pandeo local de las fibras que produce una falla catastrófica del material. Se atribuye éste mal comportamiento del laminado al proceso de fabricación de la prótesis en el cual no se logró una adherencia correcta entre el núcleo y el laminado pudiendo esto deberse a una limpieza incorrecta o poca presión de compactación del conjunto.

## CONCLUSIONES

Se mostraron los distintos estadios en el desarrollo de una prótesis destinada a uso competitivo, llevando a cabo los ensayos mecánicos pertinentes en el prototipo fabricado, que permitan validar el modelo observando luego de la realimentación, que el modelo se acerca a los valores reales de desplazamiento obtenidos en el ensayo. Esto supone una similitud entre las rigideces, estimándose un error menor al 10%. También se observa que la energía acumulada por la pieza se emparenta a los valores reales en ambos modelos, mientras que los valores de los primeros modos de frecuencia calculados en el software se encuentran alejados de los obtenidos en el ensayo. En este sentido se puede mencionar que las propiedades de los materiales utilizadas fueron obtenidas de probetas fabricadas mediante la técnica de infusión de resina, con lo cual se puede suponer que las fracciones volumétricas alcanzadas son diferentes, lo cual repercute tanto en las propiedades mecánicas del material como en su densidad. Factores a mejorar serían o bien fabricar la pieza mediante infusión o caracterizar el material obtenido mediante el proceso utilizado

para este prototipo.

Si bien la verificación del diseño luego de la fabricación se ajusta a los valores del ensayo en la parte cuasi estática, aún se desarrollan análisis dinámicos considerando efectos de segundo orden que replantean al tipo de laminado para evitar fallas catastróficas.

Respecto de los ensayos biomecánicos se puede observar que las fuerzas medidas en plataforma son algo distintas a las de carrera y es deseable alimentar el modelo con mejores inputs evaluando la carrera con la plataforma de fuerzas colocada en pista. No obstante, los valores de energía y rigidez macroscópica en la dirección de aplicación de carga de la pieza se encuentran en concordancia con lo publicado por Bruggemann[1].

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bruggemann, Arampatzis et al., 2008. '*Biomechanics of double transtibial amputee sprinting using dedicated sprinting prostheses*'.
- [2] Grabowski, McGowan, McDermott, Beale, 2009 '*Running- specific prostheses limit ground-force during sprinting*'.
- [3] Weyand, Bundle, McGowan, Grabowski, 2009. '*The fastest runner on artificial legs: different limbs, similar function?*'.
- [4] Mushin Jweeg, Shaker Hassan, 2015. '*Impact testing of new Athletic Prosthetic Foot*'.
- [5] Dyer BT1 '*An Investigation Into the Measurement and Prediction of Mechanical Stiffness of Lower Limb Prostheses Used for Running*', Sewell P, Noroozi S, 2014.
- [6] Hobara H1, Potthast W, Müller R, Kobayashi Y, Heldoorn TA, Mochimaru M 2015. '*Normative Spatiotemporal Parameters During 100-m Sprints in Amputee Sprinters Using Running-Specific Prostheses*'.
- [7] Dyer B1 '*Sprint prostheses used at the Paralympics: a proposal for an assessment method to maintain fairness*', Sewell P, Noroozi S, Redwood S, Broomfield S, Callaway A 2012.
- [8] Dyer B1 '*Sprinting with an amputation: Some race-based lower-limb step observations*', Noroozi S2, Sewell P2, 2015.
- [9] McGowan CP1, Grabowski AM, McDermott WJ, Herr HM, Kram R, 2012. '*Leg stiffness of sprinters using running-specific prostheses*'.
- [10] Shuichi Tominaga, PO,1,2,\* Keisyoku Sakuraba, MD, PhD,1 and Fumio Usui, PO3, 2015. '*The effects of changes in the sagittal plane alignment of running-specific transtibial prostheses on ground reaction forces*'.

## **DETERMINACIÓN DE EMISIONES GASEOSAS DURANTE LA CARGA DE ASFALTO EN CAMIONES CISTERNA Y EN LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE ASFALTO**

Vicente Nadal Mora, Joaquín Piechocki, Natalia Reale, Gastón Santoiani, Rodrigo Manassero, Patricia Ulloa, Santiago Pezzotti

Grupo de Ingeniería Aplicada a la Industria, UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina.  
Email: [giai@ing.unlp.edu.ar](mailto:giai@ing.unlp.edu.ar)

**Palabras clave:** Asfaltos, contaminación, emisiones

En la planta de asfaltos se dispone de 56 tanques de almacenamiento y puntos de carga de camiones cisterna para 5 tipos de asfaltos. Estas dos instalaciones generan emisiones atmosféricas en su operación, las cuales son controladas por los organismos reguladores pertinentes.

El alcance del presente trabajo comprende la caracterización de emisiones gaseosas de casos específicos para los 56 tanques de almacenamiento y puntos de carga de camiones cisterna para 5 tipos de asfaltos. Incluye la aplicación de modelos de estimación de emisiones totales en distintos regímenes de tiempo, bajo hipótesis de operación características. Abarca la estimación de la dispersión atmosférica de los contaminantes en condiciones de referencia.

Las actividades realizadas fueron:

Determinación de la composición de las emisiones en probetas de asfaltos calentados, durante la carga de camiones, y en los cuellos de cisne de los tanques de almacenamiento. En particular se buscaron las emisiones de VOCs y otros contaminantes.

Estimación de las emisiones totales en el proceso de carga de camiones en base a la formulación de un modelo matemático del proceso de carga y las mediciones realizadas.

Estimación de las emisiones totales de los tanques de almacenamiento mediante la aplicación del software TANKS en base a la formulación de un modelo matemático del proceso de carga y las mediciones realizadas.

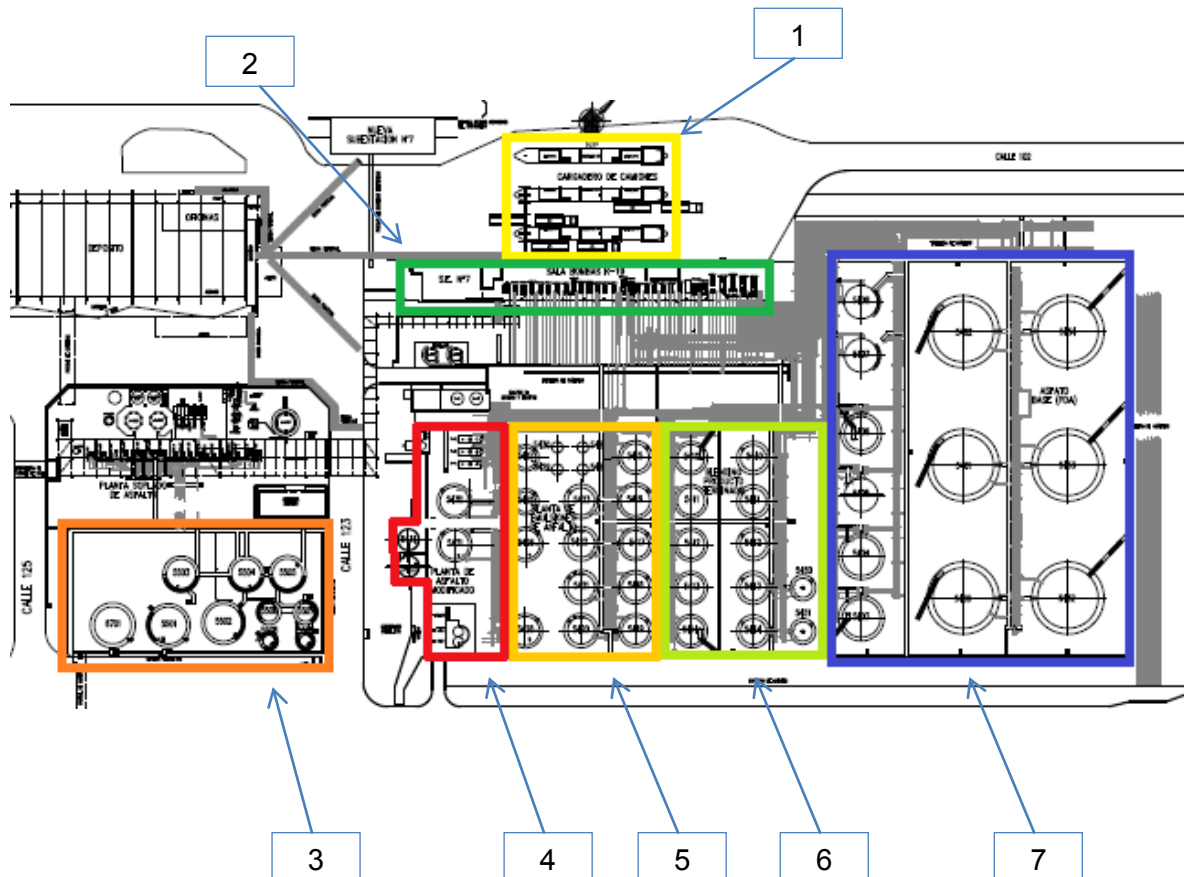
Estimación de contaminantes provenientes del proceso de carga de camiones y de los tanques de almacenamiento de asfalto mediante la aplicación del software AERMOD en escenarios definidos.

Los estudios permitieron el desarrollo de una serie de conclusiones y observaciones.

## INTRODUCCIÓN

### Sistema estudiado – Descripción General

El Sector de Asfaltos en estudio corresponde a parte de la planta de asfaltos, que se encuentra dividida en los siguientes sectores: 1, Cargadero de camiones, 2, Sala de bombas, 3, Asfalto base plástico, 4. Asfalto modificado, 5, Emulsiones de asfalto, 6, Blending de producto terminado y 7, Asfalto base. Los mismos se agrupan según el siguiente esquema:



**Figura 1** – Ubicación de los sectores de la planta de asfalto.

Los sectores de estudio son:

**Cargadero de camiones:** El cargadero de camiones es un sector donde se abastecen los camiones cisterna con producto asfáltico.



**Figura 2** – Fotografía del cargadero de camiones.



*Tanques de almacenamiento:* Comprenden 56 tanques que almacenan diferentes productos.

### Mediciones de campo

Se realizaron las siguientes determinaciones: Evaluación de ambiente laboral en cargadero de camiones, Evaluación de emisión difusa en cargadero de camiones, Evaluación de efluentes gaseosos en venteo de tanques y Evaluación de calidad de aire en la planta de asfaltos, donde se midieron: Compuestos Volátiles Orgánicos (VOC), Fracción soluble de benceno y Material particulado total.

Para la evaluación de calidad de aire se midieron en 3 estaciones de monitoreo Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xilenos, Hidrocarburos totales del petróleo, Hexano, n-heptano y n-octano.

### Estimación de las emisiones totales de contaminantes

Se aplicaron modelos de emisión global de efluentes gaseosos al conjunto de cargaderos de asfaltos. Se aplicaron modelos de estimación que permitieron establecer masas totales emitidas en las distintas instalaciones. Para la realización de las estimaciones se agruparon las distintas familias de asfaltos, con fin de aproximar el peso molecular de los vapores y su presión de vapor para cada compuesto en función de la temperatura: Asfaltos Viales, Asfaltos Modificados, Pintura Asfáltica, Emulsiones y Emulsiones de Imprimación.

El método adoptado para la estimación de emisiones para operaciones de carga ventiladas de manera directa hacia la atmósfera está dado por U.S. Environmental Protection Agency, Chapter 5.2 of the 5th edition of Ap-42 Emission Factors, U.S. EPA, "Transportation and Marketing of Petroleum Liquids", January, 1995. Por medio de esta norma se procede estimar un rango de emisiones de VOC, en donde es posible determinar una emisión promedio de referencia.

## RESULTADOS

Grupo		Promedio de emisiones, Tn/año
Asfalto Vial		5,98
Asfalto Modificado		1,00
Pintura Asfáltica		3,40
Emulsiones	EBCR	0,91
	EMA	0,14
Emulsiones de imprimación		5,98

**Tabla 1 – Resultados.**

### Emisión por componente

Para estimar la emisión de componentes específicos se consideró, por un lado, la adopción de factores de emisión aplicables a la carga de tanques, y por otro lado la medición de probetas para la corroboración de las emisiones estimadas.



Las emisiones anuales generadas por la carga de asfaltos a camiones cisternas se muestran en la tabla a continuación.

Tipo de asfalto	Emisiones totales, Tn/año	Emisiones parciales, Lb/año					
		Benceno	Clorometano	Cloroetano	Formaldehído	Iso-octano	Estireno
Vial	1,83E-01	9,53E-03	2,75E-03	3,85E-05	1,61E-02	3,30E-04	1,34E-03
Modificado	3,64E-02	1,89E-03	5,46E-04	7,64E-06	3,20E-03	6,55E-05	2,66E-04
Pintura asfáltica	7,93E-05	4,12E-06	1,19E-06	1,67E-08	6,98E-06	1,43E-07	5,79E-07
EMA	2,64E-06	1,37E-07	3,96E-08	5,55E-10	2,33E-07	4,76E-09	1,93E-08
EBCR	9,27E-05	4,82E-06	1,39E-06	1,95E-08	8,15E-06	1,67E-07	6,76E-07
E.A.I.	1,03E-04	5,38E-06	1,55E-06	2,17E-08	9,10E-06	1,86E-07	7,55E-07

**Tabla 2 – Emisión por contaminante.**

### Estimación de emisiones gaseosas en tanques de almacenamiento de asfaltos

Con el objetivo de estimar el caudal de emisiones gaseosas producidas por los tanques de almacenamiento de asfaltos se utilizó el Software TANKS. Esta aplicación es una herramienta desarrollada por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) que permite estimar las emisiones gaseosas de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y de contaminantes peligrosos del aire en tanques de almacenamiento. La aplicación se basa en los procedimientos de cálculo de emisiones del Capítulo 7, AP-42 de la EPA.

### Modelado de la dispersión de los efluentes gaseosos en la atmósfera

Para la modelación de la dispersión de los efluentes gaseosos se utilizó el programa Lakes AERMOD, que usa un modelo de dispersión de contaminantes en la atmósfera homologado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, US-EPA. Este modelo de difusión de contaminantes permite calcular la concentración de los mismos en los puntos de una grilla, en función del caudal emitido, la geometría del conducto emisor y las condiciones meteorológicas. Los valores de concentración en los distintos puntos de la grilla receptora, obtenidos en las corridas de los diferentes escenarios planteados, son comparados con los límites dados por la legislación ambiental vigente.

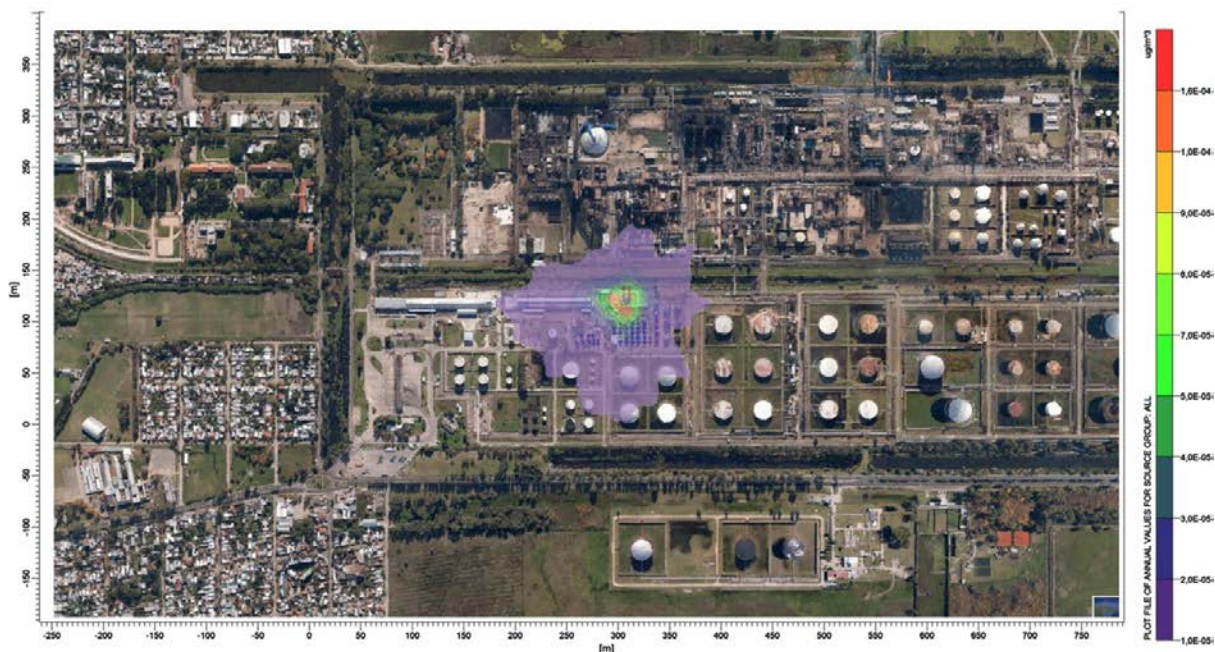
#### Escenarios planteados

Para la realización de las corridas, se plantearon tres escenarios: Escenarios Cargaderos, en donde se define la dispersión de los efluentes que se generan por las cargas de los camiones; Escenario Tanques, en donde se plantea la dispersión de los contaminantes generados por la evaporación en los tanques de almacenamiento de asfaltos, y Escenario Mixto, en donde se define la dispersión teniendo en cuenta las emisiones por evaporación en los tanques y las cargas de camiones de forma conjunta.

#### Resultados

De cada una de las simulaciones realizadas para cada contaminante y para cada tiempo de exposición, se obtiene un valor máximo de concentración en cada uno de los puntos de la grilla receptora. Se comparan estos resultados con los valores máximos permitidos por ley en cada caso, si los hubiera.

Asimismo se presentan para cada uno de estos contaminantes y cada tiempo de simulación las curvas de iso-concentración, como por ejemplo la de Benceno anual – Escenario mixto, que se presenta a continuación.



**Figura 3** – Simulación de dispersión de Benceno. Valores máximos anuales. Escenario mixto.

### Análisis de Resultados

Algunos resultados de las simulaciones, especialmente para concentraciones anuales y el Escenario Tanques, dieron nulas por lo que no pudieron dibujarse las curvas de igual concentración para las mismas. El valor de las emisiones en los tanques es bastante menor que para los cargaderos, además de tener una velocidad de salida de gases también menor. Estos dos efectos generan valores nulos de concentración en los diferentes receptores para las simulaciones en particular. Esta particularidad que se da para algunos contaminantes no significa que la emisión del Escenario Mixto sea igual al de Cargaderos, sino que al valorar las emisiones de los tanques y cargaderos a la vez, se puede apreciar el aporte que generan ambos en conjunto, los cuales, lógicamente, son mayores que para los cargaderos solos.

Se pueden observar en las curvas de concentración, especialmente en las de períodos de 1, 8 y 24 horas, que existen picos marcados en 16 diferentes direcciones. Esto se debe a que los datos meteorológicos proporcionados por el SMN no tienen una medición en continuo de la dirección de viento, sino que se lo hace en deca-gradus, lo que ya de por sí genera que todo un rango de direcciones entre en un mismo valor de la medición. Además, se suma un efecto como consecuencia que existen varias direcciones para los cuales no hay registros de vientos (en algunos casos sólo existen uno o dos registros horarios en el intervalo de cinco años utilizados). El tener 16 direcciones específicas genera que en los resultados de menor tiempo de exposición (1, 8 y 24 horas) se observen picos de mayor concentración, dado que el viento dispersa en esas direcciones a los contaminantes. Debemos tener en cuenta que las curvas graficadas se realizan con el mayor valor que se obtiene en cada punto receptor, calculado como un promedio de los valores horarios en el tiempo específico de simulación. Esto se calcula para los 5 años de datos meteorológicos.

## CONCLUSIONES

Del estudio realizado, las conclusiones más importantes son:

- Las concentraciones de los compuestos evaluados en los distintos escenarios en donde se realizaron las determinaciones cumplen con sus correspondientes límites máximos permisibles establecidos en la legislación de referencia.
- Las concentraciones de contaminantes simuladas en el entorno del cargadero y los tanques cumplen con sus correspondientes límites máximos permisibles establecidos en la legislación de referencia.

## REFERENCIAS

- [1] U.S. Environmental Protection Agency, Chapter 5.2 of the 5th edition of Ap-42 Emission Factors, U.S. EPA, "Transportation and Marketing of Petroleum Liquids", January, 1995.
- [2] NPI, 1999. Emission Estimation Technique Manual for Hot Mix Asphalt Manufacturing, Canberra, Australia: National Pollutant Inventory (NPI), Environment Australia. Available from internet.
- [3] Wypych, George. Handbook of solvents. ChemTec Publishing, 2001.
- [4] Lin, M. S., Lunsford, K. M., Glover, C. J., Davison, R. R., & Bullin, J. A. (1995). The effects of asphaltenes on the chemical and physical characteristics of asphalt. In Asphaltenes (pp. 155-176). Springer US.
- [5] Gasthauer, E., et al. "Characterization of asphalt fume composition by GC/MS and effect of temperature." Fuel 87.7 (2008): 1428-1434.
- [6] TuTiempo.Net
- [7] "Energía solar en la Ciudad de Buenos Aires" Agencia de Protección Ambiental, Juan Carlos Villalonga.
- [8] Trumbore, D. C. "Estimates of air emissions from asphalt storage tanks and truck loading" Environmental progress, 18(4), 250-259. 1999.

## ESTUDIO COMPARATIVO DE TRANSFERENCIA TÉRMICA DE TOBERA SUPERSÓNICA

Ho, Yen Kun y Scarabino, Ana

Grupo de Fluidodinámica Computacional (GFC), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Argentina, [matias.jauregulorda@ing.unlp.edu.ar](mailto:matias.jauregulorda@ing.unlp.edu.ar)

Palabras Claves: CFD, Tobera, Transferencia, Calor

### INTRODUCCIÓN

El presente trabajo consiste en simular numéricamente mediante fluidodinámica computacional (CFD) un ensayo experimental de transferencia de calor del aire caliente hacia la pared de una tobera supersónica, cuyos resultados fueron publicados en el trabajo “Convective heat transfer in a convergent-divergent nozzle” de L. H. Back y sus alumnos. El estudio de dicha transferencia de energía en forma de calor es una parte crítica con respecto al diseño de un motor cohete, ya que los gases calientes que fluyen en el interior de la tobera pueden alcanzar valores de temperaturas mucho más altos que las temperaturas de fusión de los materiales utilizados en su construcción. Por lo tanto, es esencial tener conocimientos del comportamiento de esta transferencia térmica para saber la cantidad de energía que se transfiere en forma de calor y estimar la distribución de temperaturas alcanzadas por los materiales. El objetivo principal de obtener estos resultados parciales es comparar los diferentes modelos numéricos y de turbulencia evaluando los más óptimos en este tipo de problemas para que los mismos sean utilizados en el proceso de diseño de un nuevo motor cohete.

En el trabajo experimental citado anteriormente, se presentaron resultados de ensayos de transferencia de calor convectiva en una tobera convergente-divergente con las paredes refrigeradas. La investigación cubrió un rango de presión de remanso desde 30 hasta 250 psia y de temperatura de remanso desde 1.030 hasta 2.000 °R. Para llevar a cabo el experimento, se calienta aire comprimido con metanol combustionado y los dos gases se mezclan uniformemente antes de entrar a la tobera. La distancia de mezclado y de combustión permite minimizar la no-uniformidad de la mezcla. Con respecto a la geometría de la tobera, esta misma tenía una garganta de 1,803 pulgadas de diámetro, una relación de contracción de área de 7,75 a 1, una relación de expansión de área de 2,68 a 1, un ángulo de convergencia de 30° y un ángulo de divergencia de 15°. El número de Mach a la salida de la tobera era aproximadamente 2,5. Finalmente, los resultados de la transferencia de calor convectiva local fueron obtenidos mediante mediciones de temperaturas en estado estacionario con termocuplas colocadas en la pared de la tobera, la que estaba refrigerada con agua. En la Figura 1 se presenta un esquema simplificado de la configuración de las instalaciones experimentales del ensayo. Vale mencionar que los efectos de radiación son despreciables en el rango de las temperaturas de remanso ensayadas. Para determinar la distribución de la presión estática a lo largo de la tobera, 32 tomas estáticas fueron colocadas circunferencial y axialmente en la pared de la tobera. Dichas presiones fueron medidas mediante manómetros de mercurio.

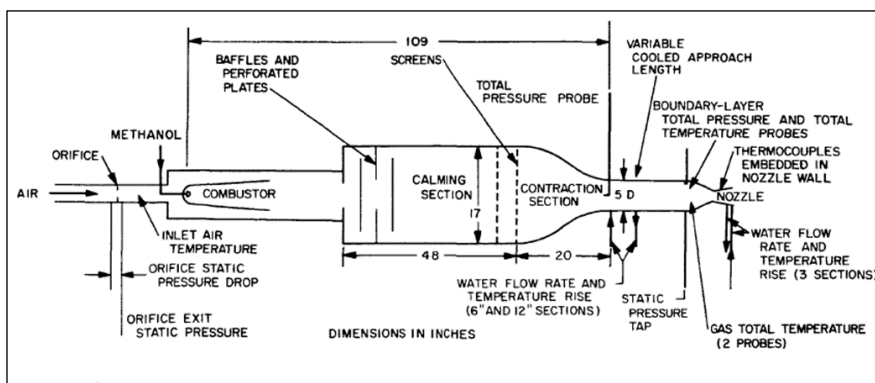


Figura 1: Diagrama del flujo y de la instrumentación del ensayo experimental

### METODOLOGÍA

Las simulaciones numéricas del flujo del aire caliente que circula en el interior de la tobera fueron realizadas con el código Fluent de ANSYS. Se utilizaron solvers basado en densidad con el esquema Roe y basado en presión con el algoritmo acoplado de presión – velocidad. Las simulaciones de ambos solvers fueron realizadas con el modelo de turbulencia  $k - \omega$  SST. Con respecto al flujo del aire caliente, este mismo fue simulado en régimen estacionario y compresible. La relación del flujo másico metano – aire es suficientemente pequeña, inclusive para el caso de temperatura de remanso más alta, como para que las propiedades de la mezcla tengan muy poca diferencia con las del aire. Por lo tanto, el fluido empleado en la simulación es aire. A continuación, se presentan en la Tabla 1 las propiedades más importantes de los materiales utilizados en la simulación: aire y Acero 502 para la pared de la tobera.

Aire		Acero 502 Type	
Densidad	Ecuación de gas ideal	Densidad	8030 kg/m <sup>3</sup>
C <sub>p</sub>	1006,43 j/kg K	Conductividad térmica	36,7 W/m K
Conductividad térmica	0,0242 W/m K	Espesor de la pared	7,4168 mm
Viscosidad	Ecuación de Sutherland; $\mu_0 = 1,716e^{-5} \text{ kg/ms}$ $T_0 = 273,11 \text{ K}$ $S = 110,56 \text{ K}$		

Tabla 1. Propiedades de los materiales utilizados en la simulación

En primer lugar, se procedió a generar la geometría de la tobera convergente – divergente utilizada en los ensayos experimentales. El modelo creado es bidimensional con simetría axial, el cual se presenta en la siguiente Figura 2.



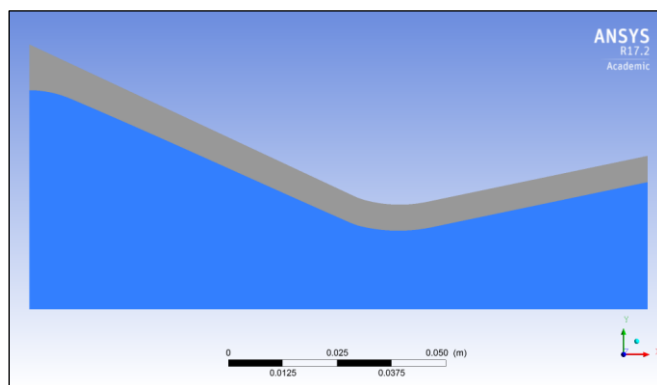


Figura 2. Geometría bidimensional axial-simétrica de la tobera

Luego de crear la geometría bidimensional, se procede a generar un mallado estructurado con densidad relativamente gruesa que tiene 5.395 elementos. Este mallado grueso (“coarse”) fue refinado varias veces en la región de la capa límite para obtener en el primer elemento un valor de  $y^+$  que fuera adecuado (entre 1 a 5) para el modelo de turbulencia que se utilizó en las simulaciones del presente trabajo (modelo de turbulencia  $k - \omega$  SST). Luego de los refinamientos mencionados, este mallado grueso pasó a tener 36.139 elementos. En la siguiente Figura 3 se muestra el mallado después de los refinamientos explicados anteriormente, con una ampliación en la región cercana de la capa límite.

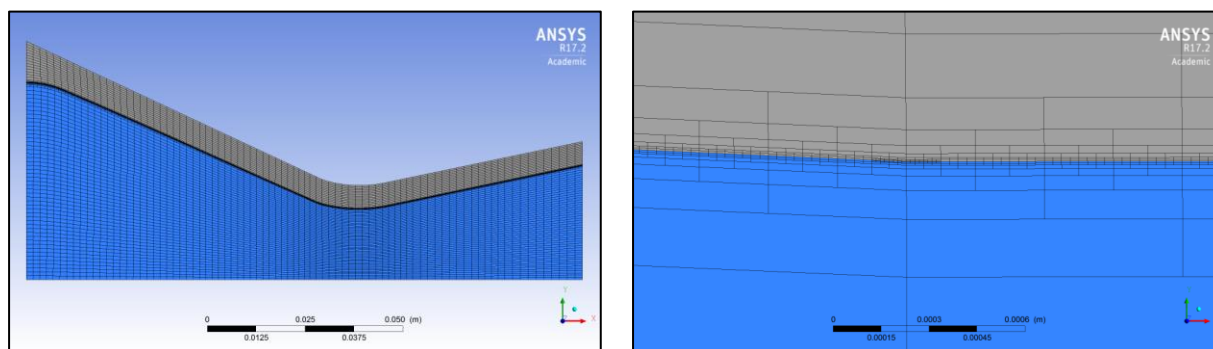


Figura 3. Mallado grueso (coarse) después de ser refinado en la región de capa límite con detalle en la garganta

A los efectos de poder realizar la simulación del flujo de aire, es necesario definir las condiciones de borde de las fronteras de la región del fluido y de la del sólido. En la siguiente Figura 4 se presenta un esquema de las condiciones de borde utilizadas en cada una de las fronteras del dominio. En la entrada del dominio se ha impuesto una condición de flujo de masa de 1,16 kg/s. En la salida del dominio de cómputo, la presión atmosférica de 101.325 Pa es impuesta como condición de borde. Luego, en la pared externa se han implementado las temperaturas aproximadamente constantes en el tiempo que fueron medidas durante el ensayo experimental realizado, las cuales se muestran en la Figura 5. Se puede observar en la Figura 4 que el dominio está dividido en 8 particiones con el objetivo de poder fijar los distintos valores de temperaturas en la pared externa. Por otro lado, en las paredes internas fue impuesta la condición de no – deslizamiento y las temperaturas fueron obtenidas de los resultados de simulación. Finalmente, en el eje central de la tobera se ha planteado la condición de simetría axial.



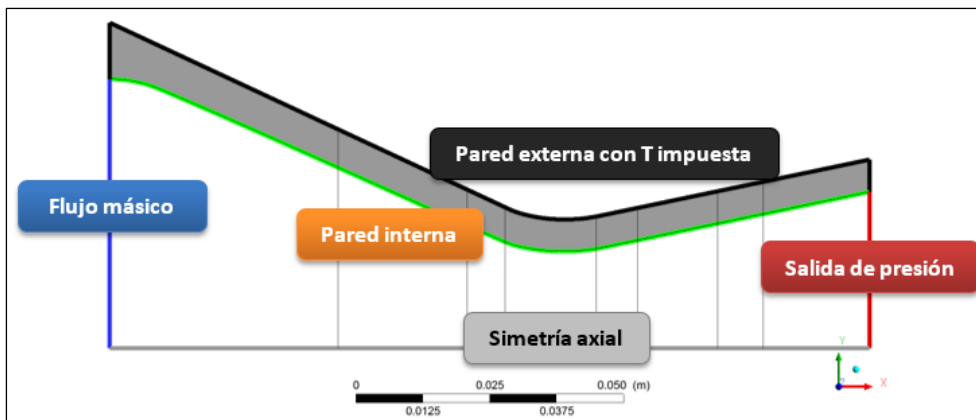


Figura 4. Esquema de las condiciones de borde

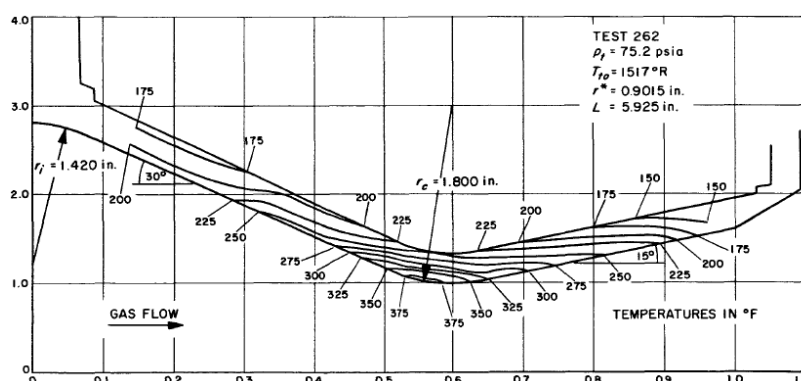


Figura 5. Curvas isotérmicas en la pared interna y externa de la tobera para el test 262

Una vez que la solución numérica convergió para el mallado grueso, se realizaron las simulaciones para un mallado con densidad mediana y fina que cuentan con 64.318 y 127.834 elementos respectivamente. El objetivo de este tipo de análisis consiste en verificar que la solución numérica sea independiente del mallado utilizado para asegurarse de que la discretización espacial sea adecuada para el tipo de problema simulado.

Para verificar dicha independencia del mallado se toman como valor de referencia el flujo de calor en la pared interna del área de la garganta. En la siguiente Tabla 2 se presentan dichos valores de referencia y sus cambios porcentuales. Se pudo verificar que los resultados numéricos están cerca de la región asintótica ya que el cambio porcentual del valor de referencia entre el mallado “medium” y el mallado “fine” es despreciable. Vale mencionar que los valores presentados en la Tabla 2 corresponden a la simulación realizada con solver basado en densidad. Para la simulación con el solver basado en presión, se utiliza directamente el mallado fino en el cual se ha verificado que la discretización espacial es correcta.

Mallado	Flujo de calor en A* (w/m2)	Cambio %
“Coarse”	576.107	-----
“Medium”	626.137	7,99
“Fine”	628.802	0,42

Tabla 2. Valor del flujo de calor en la garganta para los tres mallados

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan algunos de los resultados de la simulación numérica. En primer lugar, la Figura 6 muestra los campos de temperatura en todo el dominio de cálculo, es decir tanto en el interior como en la pared de la tobera supersónica para los dos solvers utilizados (basado en densidad y en presión). Estas imágenes permiten obtener una primera visualización de las variaciones de temperatura y una primera corroboración de los resultados en cuanto a las distribuciones de la misma.

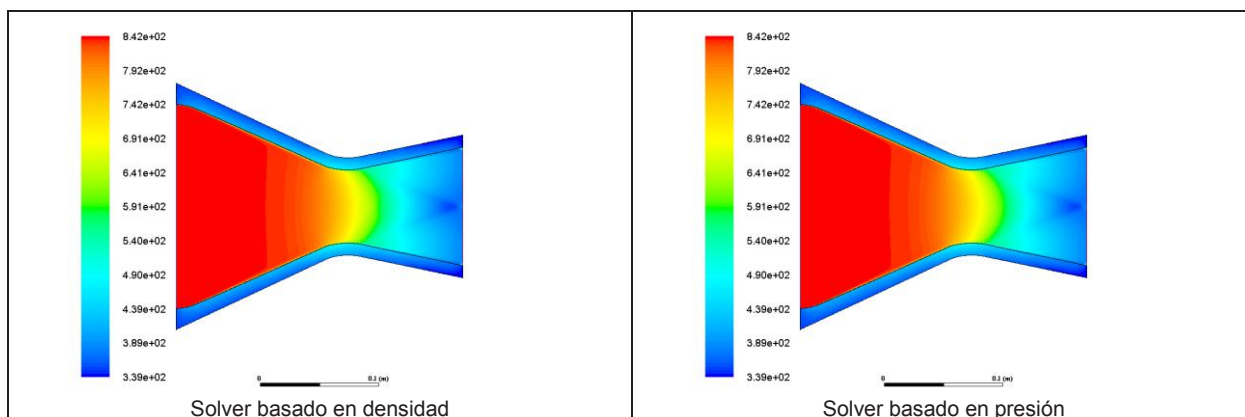


Figura 6. Contornos de temperatura en el dominio de cómputo para los dos solvers

En la Figura 7 se presentan y se comparan los valores obtenidos experimental y numéricamente de las temperaturas a lo largo de la pared interna de la tobera convergente-divergente. En líneas generales se pueden observar buenas concordancias entre los resultados de las temperaturas que se obtuvieron numérica y experimentalmente. En cuanto a las temperaturas en la pared interna, la diferencia más grande entre los estudios experimentales y la simulación numérica es menor del 10% con la excepción de la locación  $z/L = 0,573$  en donde la temperatura medida arrojó un valor que parecería estar fuera del comportamiento general de la distribución de temperaturas. Finalmente, se puede observar que los resultados obtenidos con los dos solvers distintos no presentan prácticamente diferencias.

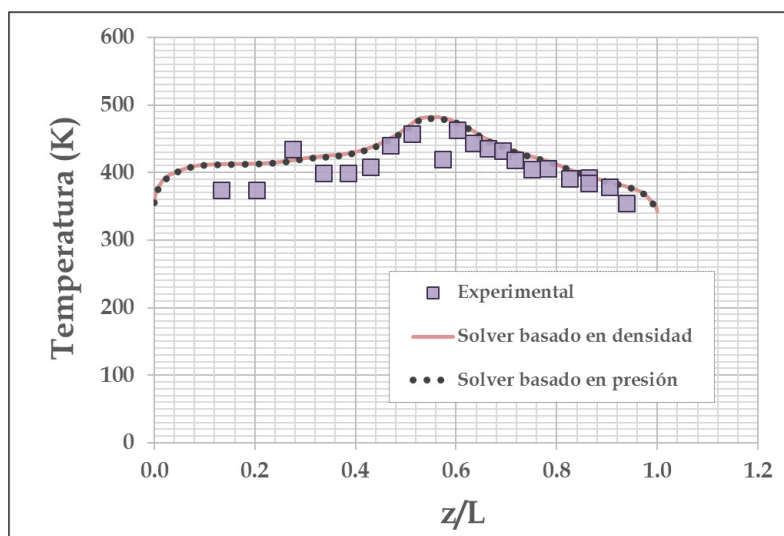


Figura 7. Comparación de resultados numéricos con experimentales (temperatura en la pared interna)

## CONCLUSIONES

Las distribuciones de temperaturas en la pared interna de la tobera numéricas y experimentales fueron comparadas y se han observado buenas concordancias entre los resultados pero con una tendencia general a que la solución numérica sobreestime los valores de la temperatura en la pared interna de la tobera. Dicha sobreestimación de temperaturas se observa principalmente en la región convergente de la tobera, siendo la mayor diferencia entre los resultados numéricos y experimentales un 9,42% que tiene lugar en la estación  $z/L = 0,0204$ . Por lo tanto, se puede considerar que la solución numérica es válida para ser utilizada en la predicción de la distribución de temperaturas. Además, los resultados obtenidos mediante los dos solvers diferentes no presentan prácticamente diferencias. Por lo tanto, se puede concluir que tanto el solver basado en densidad como el basado en presión es válido para simular este tipo de problemas.

En esta etapa del trabajo, se realizó la simulación con dos solvers diferentes y con el mismo modelo de turbulencia, se pretende reproducir el experimento numéricamente usando otros modelos de turbulencia y tratamientos de la pared para obtener más informaciones sobre el comportamiento de estos mismos en este tipo de problemas de transferencia térmica. El objetivo es seleccionar, en base de las comparaciones de los distintos resultados numéricos, el esquema y el modelo de turbulencia más adecuado para ser usados en la predicción de la distribución de temperaturas a lo largo de la pared de la tobera. Esta predicción de valores de temperaturas es una etapa esencial en el proceso de diseño de nuevos motores para lanzadores satelitales. El objetivo final de esta línea de trabajo es tener herramientas de simulación suficientemente confiables y validadas para lograr una optimización en el diseño de forma rápida y eficiente.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bacchi, F., Suarez, S., Scarabino, A., Análisis Numerico del flujo en una tobera supersónica. Primeras Jornadas de Investigación y Transferencia - Facultad de Ingeniería-UNLP. Abril 2011.
- Back, L. H., Massier, P. F., Gier, H. L., Convective Heat Transfer in a Convergent – Divergent Nozzle. International Journal of Heat and Mass Transfer. Mayo 1964.
- P. L. Roe, Characteristic based schemes for the Euler equations, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 18 337 – 365, 1986.
- F. R. Menter, Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, AIAA journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598 – 1605, agosto 1994.
- Ferziger J.H. y Peric M, Computational Methods for Fluid Dynamics, 3rd ed. Springer, 2002.
- Hagemann, G., Immich, H., Van Nguyen, T., Dumnov, G. E., Advanced Rocket Nozzles. Journal of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 5, Septiembre 1998.
- Huzel, D. K., Huang, D. H., Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines. AIAA, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, USA. 1992.
- O'Leary, R. A., Beck, J. E., Nozzle design. Rocketdyne's engineering journal of power technology, Pratt and Whitney, No. 8, 1992.
- Simmons, F. S., Rocket Exhaust Plume Phenomenology. The Aerospace Press, American Institute of Aerospace and Astronautics, 2000.
- Sutton, G. P., Biblarz, O., Rocket Propulsion Elements. John Wiley & Sons. 2001.
- Wilcox, D. C., Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, La Cañada, USA, 2nd ed., 1998

## ANÁLISIS DE LA DESCARGA DE UNA TOBERA SUPERSÓNICA Y SU IMPACTO SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA

Jaurequi Lorda, Matias, Scarabino, Ana

Grupo Fluidodinámica Computacional, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 s/n, La Plata (1900),  
matias.jaurequilorda@ing.unlp.edu.ar

### INTRODUCCIÓN

El impacto de chorros supersónicos sobre objetos sólidos es de gran interés debido a su presencia en cantidad de aplicaciones, entre las que podemos citar separación de cohetes de múltiples etapas, operación de propulsores para control de vehículos espaciales, anclaje de satélites, deflectores de gases para el momento de lanzamiento de cohetes, entre otras. Un chorro turbulento impactando sobre un plato genera fluctuaciones importantes de presión que generan vibraciones en el mismo plato. Estas fluctuaciones dependen de varias características: si el chorro es subsónico o supersónico, la geometría de la tobera, la relación de presiones de la tobera (presión de salida de la tobera sobre presión ambiente), la distancia entre tobera y plato y la disposición y tamaño del plato u objeto que recibe el impacto [1].

Los fluidos que impactan sobre superficies generan fuertes ondas acústicas, usualmente con efectos negativos, como el hecho de niveles elevados de ruido y vibraciones mecánicas. Es por ello que es necesario entender como la presión sobre la superficie de impacto se ve afectada por cambios en la relación de presiones de la tobera, la distancia entre tobera y cuerpo y la geometría de la superficie de impacto.

Existen varias publicaciones en esta temática que contribuyeron a lograr un mayor entendimiento del fenómeno planteado. Las primeras publicaciones [2] se centraban en medir presión en varios puntos de la superficie impactada, y las discusiones no abordaban cómo variaban los patrones de flujo del chorro antes del impacto. Si bien el fenómeno del impacto de un chorro supersónico depende de varios parámetros, como la relación de presión RP, la distancia tobera-placa, y la geometría de la misma, los resultados experimentales no abarcaban todos los casos, especialmente los casos con alta relación de presión.

En los siguientes trabajos [3-4] se utilizaron nuevas técnicas de visualización para investigar el patrón de flujo de un chorro impactando contra una placa plana variando el ángulo de la placa, la distancia a la misma y la relación de presión RP. Los resultados mostraron que se podía clasificar el flujo en tres tipos, dependiendo de la conformación de las estructuras de ondas de choque.

Posteriormente hubo estudios numéricos computacionales [5-6] que utilizaron programas propios para intentar reproducir los resultados experimentales de la bibliografía. Estos pudieron concluir que la estructura de flujo para este problema es compleja y que existen diversos factores que influyen en la localización del punto de mayor presión sobre la placa.

Más actualmente, se realizaron estudios computacionales [7], con el software comercial ANSYS CFX, de ensayos experimentales de un chorro supersónico impactando sobre una placa plana inclinada. Para ello utilizó 4 modelos RANS de turbulencia: k- $\omega$  estándar, k- $\epsilon$  estándar, k- $\omega$  SST y k- $\epsilon$  RNG. Se concluye que los métodos RANS son adecuados para capturar los detalles del flujo supersónico de un jet impactando sobre un plano inclinado.

Otros modelos de deflectores han sido estudiados recientemente, como el caso de los deflectores axial simétricos, similares a un cono pero con punta y base redondeada. Estudios numéricos [8] con un modelo de volúmenes finitos centrado en las celdas y un modelo de turbulencia RANS  $k-\epsilon$  muestra aceptables resultados versus resultados experimentales comparando algunos casos de interés. También se utilizó [9] el software comercial ANSYS Fluent con el modelo de turbulencia Spalart-Allmaras para estudiar cómo la variación de la distancia entre tobera y deflector afecta el pico de presión máxima sobre el deflector.

La complejidad del estudio del impacto de un chorro supersónico sobre una superficie radica en que los flujos a elevado número de Mach y de Reynolds introducen una dificultad considerable en los análisis numéricos, debido a que hay que considerar los efectos de compresibilidad y las características turbulentas del flujo [10]. Por un lado, la densidad del fluido ya no puede considerarse constante y se debe resolver, además de las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento (Navier-Stokes), la ecuación de conservación de energía y ecuaciones de estado adicional, con el fin de relacionar todas las variables fluidodinámicas y termodinámicas que intervienen en el problema. Por otra parte, el carácter matemático de las ecuaciones cambia de elípticas a hiperbólicas según el flujo sea subsónico o supersónico, lo que hace que los métodos más adecuados para flujo de un tipo no necesariamente reproduzcan bien el otro y viceversa.

El objetivo del trabajo es validar un modelo numérico frente a datos experimentales [2] estudiando dos casos: el chorro supersónico expandiéndose libremente en la atmósfera y el mismo impactando contra una placa plana perpendicular a la pluma.

## METODOLOGÍA

Se realizó un análisis computacional con un algoritmo basado en densidad, con distintos modelos de turbulencia RANS:  $k-\epsilon$  Realizable,  $k-\omega$  SST y SpalartAllmaras. Los modelos a estudiar fueron 2D y axial simétricos, analizándose los valores de la presión sobre el dominio y la placa plana. El modelo cuenta con una tobera con Mach de salida de 2,2 y una relación de presiones (presión de salida sobre presión atmosférica) de 1,2.

La Figura 1 muestra la geometría de la tobera empleada con sus medidas. La misma se utilizó para los dos casos, y consta de una tobera convergente-divergente cónica de  $15^\circ$  de apertura.

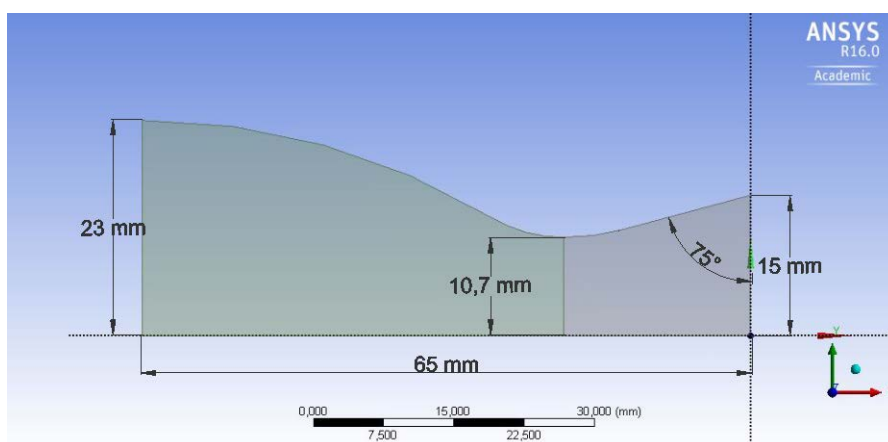


Figura 1. Geometría de la tobera [2].

Para el dominio del chorro libre se tomaron distancias relacionadas con el diámetro de salida de la tobera ( $D_s$ ). La Figura 2 muestra las medidas tomadas para el dominio, utilizando los mismos valores que utilizaron otros autores [11].

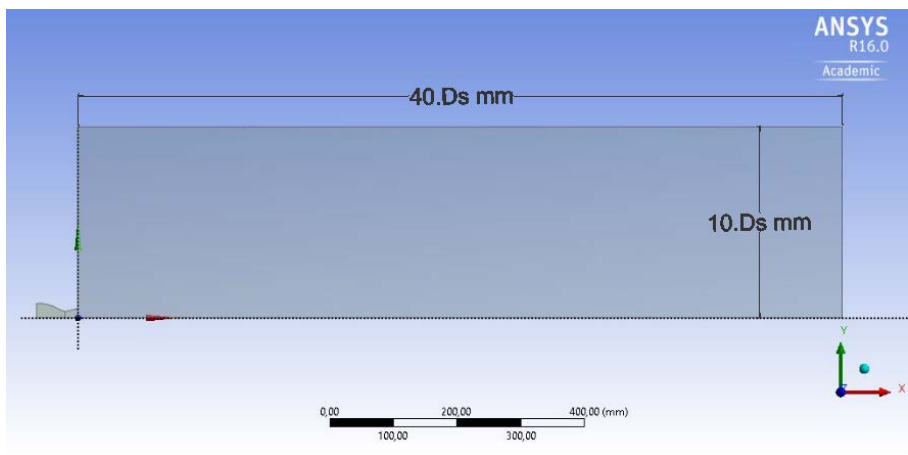


Figura 2. Dominio del chorro libre.

Se compararon los valores sobre el eje del chorro con los datos experimentales, en donde se midió la presión con un tubo Pitot. A raíz de esto, se debió utilizar la ecuación del tubo Pitot de Rayleigh[12 ], que resulta de comparar la presión de remanso medida en un tubo Pitot cuando se lo dispone en un flujo supersónico. La Figura 3 muestra cómo varían los parámetros característicos para este problema.

$$\frac{P_{02}}{P_1} = \left( \frac{(\gamma + 1)^2 M_1^2}{4\gamma M_1^2 - 2(\gamma - 1)} \right)^{\gamma / (\gamma - 1)} \frac{1 - \gamma + 2\gamma M_1^2}{\gamma + 1}$$

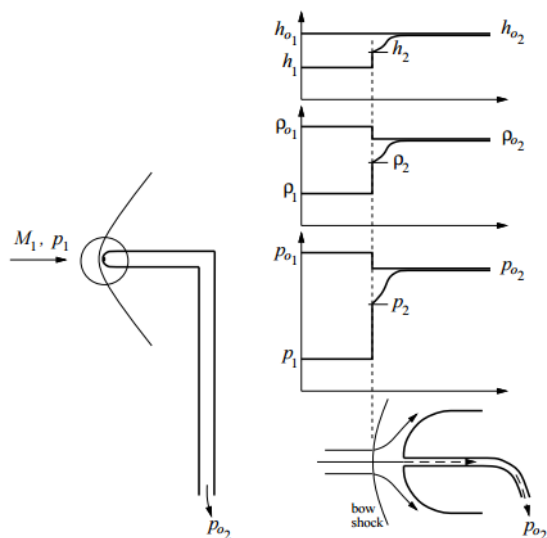


Figura 3. Tubo Pitot en flujo supersónico [ 12 ]

Se utilizó un mallado estructurado de 8,5.104 elementos cuadriláteros aproximadamente. Se emplearon elementos más pequeños en las cercanías de la salida de la tobera, de manera de tener un mallado más refinado en las zonas de mayor gradiente de presión. Esto se ve en la Figura 4.



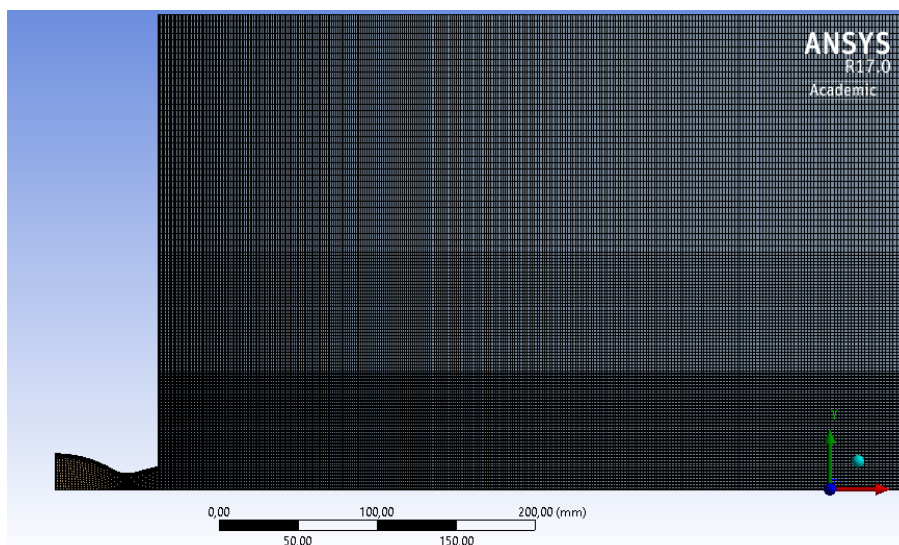


Figura 4. Mallado del caso del chorro libre.

El segundo caso de validación es el de un chorro impactando sobre una superficie plana a  $x/D_s = 4$  [2]. El objetivo de esta comparación es demostrar que nuestro modelo reproduce de adecuada manera los datos experimentales cuando existe un impacto supersónico, que presenta mayor complejidad que un chorro libre, debido a los complejos patrones de onda de choque formados producto del impacto [3]. La geometría empleada es la visualizada en la Figura 5.

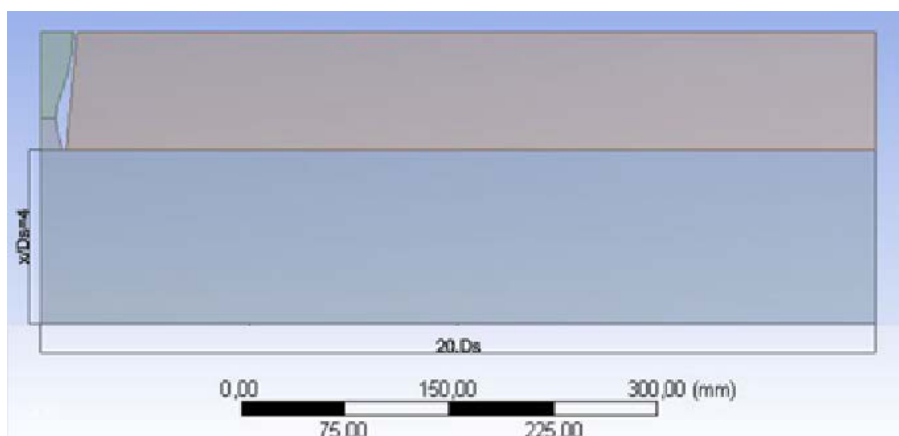


Figura 5. Dominio del chorro impactando contra una placa plana.

Se utilizaron tres mallados estructurados empleando elementos cuadriláteros. Estos cuentan con  $1,5 \cdot 10^4$ ,  $5,3 \cdot 10^4$  y  $2,9 \cdot 10^5$ , para los mallados “grueso”, “medio” y “fino”, respectivamente. Esto permitió una calidad de malla con un skewness inferior a 0,25, una relación de aspecto menor a 40 y una ortogonalidad mayor a 0,9.

## RESULTADOS

En la Figura 6 se observa la comparación del campo de flujo para el CFD con los resultados experimentales a la derecha. A la izquierda se compara los valores de presión sobre el eje longitudinal del sentido del chorro, observándose la buena concordancia en las curvas.

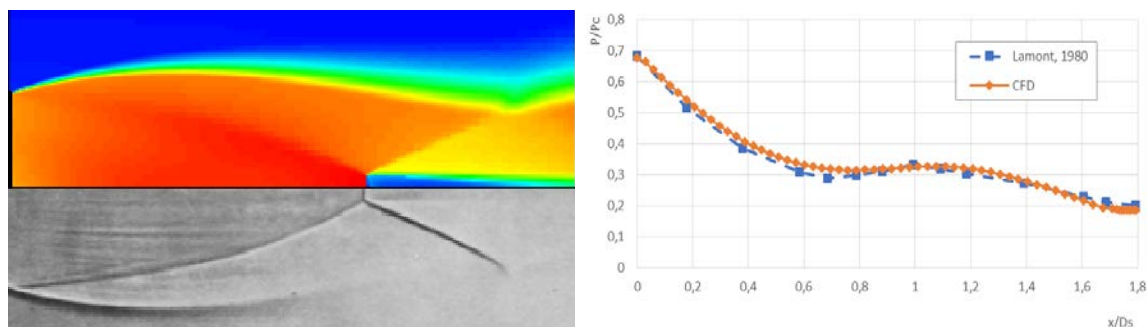


Figura 6. Comparativa de velocidad (Der.),  $P/P_c$  sobre el eje (Izq.), caso chorro libre.

En la bibliografía se establece a qué distancia se encuentran las sucesivas ondas de choque (“discos de Mach”) que se forman en un chorro supersónico libre. Comparando las distancias desde la salida de la tobera hasta donde se visualizan estas ondas, podemos completar la validación del modelo para un chorro libre. Esta comparación se detalla en la siguiente tabla.

<i>Disco de Mach</i>	Experimental	CFD	Error absoluto	Error relativo
1ero	1,78	1,82	0,04	2,25%
2do	4,2	4,33	0,13	3,10%
3ero	6,8	6,97	0,17	2,50%
4to	9,6	9,59	0,01	0,10%
5to	--	11,57	--	--
6to	--	13,62	--	--

Para el caso del chorro impactando contra una placa plana, los resultados muestran que el mallado grueso no reproduce la curva de presión sobre el deflector debido a que no se llega a captar la estructura de ondas de choque del problema. Para el mallado medio y fino hay una buena concordancia con los resultados experimentales (ver Figuras 7 y 8)

Cuando se varía el modelo de turbulencia, se observa que los modelos Spalart-Allmaras y  $k$ - $\omega$  SST no muestran el pico máximo local y la distribución es prácticamente constante hasta una distancia de  $1,5.D_s$ . La mejor distribución se observa con el modelo  $k$ - $\epsilon$  Realizable.

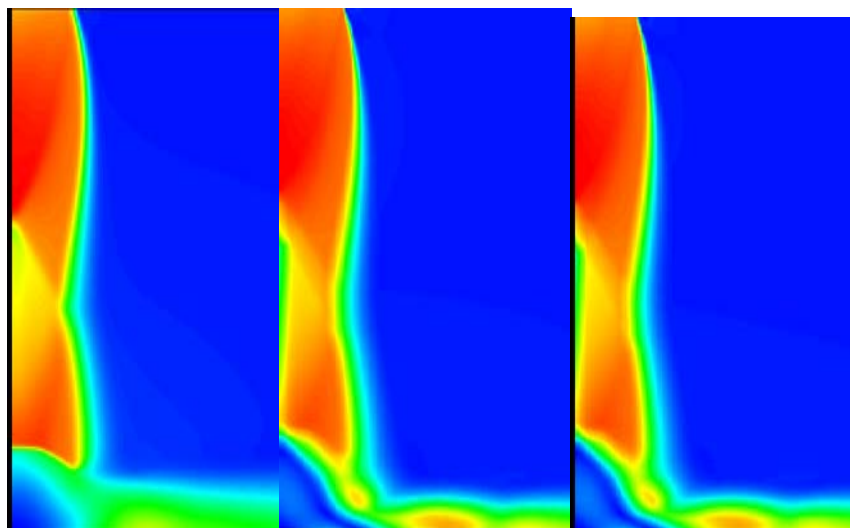


Figura 7. Campo de velocidad (m/s) para el mallado grueso (Der.), medio (Centro) y fino (Izq.)

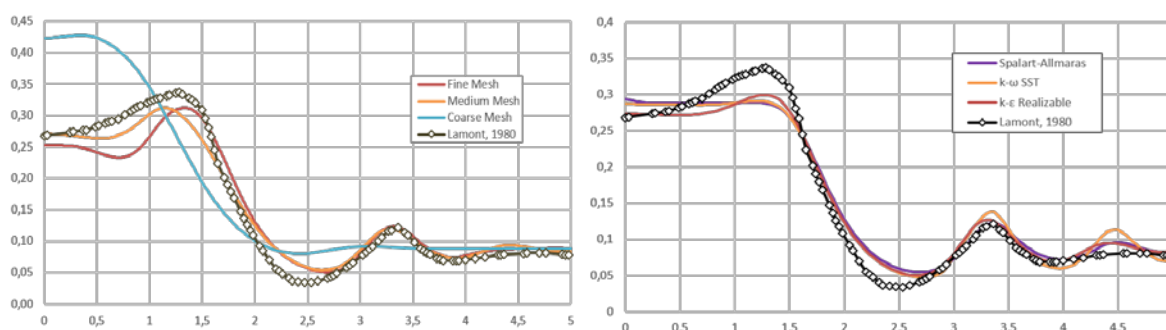


Figura 8. Comparación de distintos mallados (Der.), y distintos modelos de turbulencia (Izq.).

## CONCLUSIONES

Se logró validar el modelo numérico tanto para el caso del chorro libre a la atmósfera, como el caso impactando contra una placa plana. Se observa buena concordancia con los datos experimentales, siempre y cuando se tenga un mallado lo suficientemente refinado que logre captar el patrón de ondas de choque de la pluma. El modelo de turbulencia óptimo observado es el k-epsilon Realizable.

Con este modelo, se puede estudiar a futuro distintos modelos de deflectores, de manera de poder estudiar el campo fluidodinámico para cada caso.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] G.P. Sutton, O. Biblarz, Rocket Propulsion Elements, 7th Edition, John Wiley & sons Inc, ISBN 0-471-32642-9, 2001.
- [2] P.J. Lamont, B.L. Hunt, The impingement of underexpanded, axisymmetric jets on perpendicular and inclined flat plates, Cambridge Journal of Fluid Mechanics vol. 100, part 3, pp. 471-511, 1980.
- [3] Y. Nakai, N. Fujimatsu, K. Fujii, Flow Classification of the Under-Expanded Super Sonic Jet Impinging on a Flat Plate, 33rd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Orlando, Estados Unidos, Junio 2003.

- [4] Y. Nakai, N. Fujimatsu, K. Fujii, Experimental Study of Underexpanded Supersonic Jet Impingement on an Inclined Flat Plate, AIAA Journal Vol. 44, No. 11, Noviembre 2006.
- [5] K. Mcilroy, K. Fujii, Computational analysis of supersonic under-expanded jets impinging on an inclined flat plate – part I, 37th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Miami, Estados Unidos, 2007.
- [6] Y. Goto, T. Nonomura, K. Mcilroy, K. Fujii, Detailed Analysis of Flat Plate Pressure Peaks Created by Supersonic Jet Impingements, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, Estados Unidos, 2009.
- [7] M. Dharavath, D. Chakraborty, Numerical Simulation of Supersonic Jet Impingement on Inclined Plate, Defence Science Journal, Vol. 63, No. 4, pp. 355-362, Julio 2013.
- [8] R.C. Mehta, Numerical Simulation of Supersonic Turbulent Jets Impinging on an Axisymmetric Deflector, Indian Journal of Engineering & Materials Science, Vol. 9, pp. 227-236, Agosto 2002.
- [9] A. Ahmed, A. Baig, S. Bilal, S. Zahir, CFD Analysis of Supersonic Jet Impingement on Axisymmetric Deflector Plate, 9th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology, Islamabad, Pakistan, 2012.
- [10] J.H. Ferziger, M. Peric, Computational Methods for Fluid Dynamics, 3rd Edition, Springer ISBN 3-540-42074-6, 2001.
- [11] Pundir, B., Surface Pressure Fluctuations due to an Impinging Underexpanded Supersonic Jet”, Tesis PhD, Florida Atlantic University, Estados Unidos, 2011.
- [12] Anderson, J. D., “Fundamental of Aerodynamics”, 5th Edition, McGraw-Hill, 2011.

## USO DIDÁCTICO DE COHETES DE AGUA EN LAS ESCUELAS TÉCNICAS COMO PROYECTO DE INTRODUCCIÓN A LA INGENIERÍA

**Juan I. Villar<sup>a</sup>, Ariel. Di Jorgi<sup>a</sup>, Leonardo Castelli<sup>a</sup>, Juan Meschini<sup>a</sup>, Luciano Verona<sup>a</sup>**  
Email: [juanignacio.villar@ing.unlp.edu.ar](mailto:juanignacio.villar@ing.unlp.edu.ar)

<sup>a</sup>Dpto. Aeronáutica., Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 e/ 47 y 48 - (1900), Provincia de Buenos Aires, Argentina

### INTRODUCCIÓN

Esta actividad de extensión versa sobre la intervención de la facultad de ingeniería de La UNLP en tres escuelas técnicas de la región para incitar el interés del alumnado en el estudio de la ingeniería planteando una problemática abierta que deban resolver haciendo uso de herramientas teórico prácticas de modo de cumplimentar una determinada misión objetivo e integrándolos con las evaluaciones de fin de semestre de trabajos integradores de alumnos de la facultad de ingeniería de la UNLP, del área de Fluidodinámica.

La actividad tiene como objetivos articular contenidos y metodologías de enseñanza de física aplicada entre ambos niveles educativos, permitiendo además generar el espacio propicio para afrontar problemas de tipo abierto en el que se deban asumir soluciones ingenieriles tendientes a optimizar los resultados, incrementar el interés en el trabajo en equipo, con objetivos particulares y generales fomentando además la curiosidad, capacidad de análisis teórico, experimentación práctica y espíritu crítico en la valoración de los resultados.

Mediante la implementación de medios didácticos de simulación y las actividades en los talleres y/o laboratorios correspondientes al ciclo superior de la escuela técnica, se abordan estas problemáticas y las que surgen como contenidos en las materias afines a la prácticas profesionalizantes.

La operación del cohete de agua consiste en expeler un chorro de agua desde la tobera el cohete usando aire comprimido alojado en su interior. Al apuntar hacia el cielo la gravedad naturalmente estratifica el contenido del cohete de modo tal que el aire no podrá escapar sin antes haber empujado toda el agua fuera de la cámara interior, así la energía acumulada en el aire, es eficientemente transformada en energía cinética del chorro de salida de agua, cambiando su cantidad de movimiento y por la 3ª ley de Newton empuja el cohete hacia arriba.

Al buscar alcanzar la mayor distancia posible, debido a su baja densidad el empuje provisto solo por aire resulta despreciable, mientras que un cohete cuya cámara esté completamente llena de agua, no puede ser presurizada y no habrá energía almacenada para convertir en cinética, resultando el problema en uno de optimización.

Las ecuaciones de la dinámica que gobiernan el movimiento incluyen la resistencia, el empuje, (funciones de la velocidad desarrollada y de salida respectivamente), y el peso que varían en el tiempo, convirtiendo la ecuación diferencial del movimiento en una de segundo orden no homogénea de coeficientes no constantes.

La no linealidad del problema de dinámica presentado y el acoplamiento de las variables en las ecuaciones que lo gobiernan hacen que sea sumamente apropiado también para introducir métodos numéricos de cálculo, simulación y permitiendo la corroboración de su validez mediante la experimentación.

El efecto de un trabajo mancomunado permite además lograr la formación de nuevos extensionistas y fortalecer el vínculo con las escuelas técnicas que ya se encuentran desarrollando actividades de extensión conjuntas con la UNLP.

## **METODOLOGÍA PARTE EXPERIMENTAL**

El proyecto tiene por destinatarios los alumnos de las escuelas técnicas de la región de La Plata - Berisso - Los Hornos en grupos de al rededor de 15 a 20 alumnos.

Inicialmente las escuelas intervinientes serán las EET N° 2 "Ing Emilio Rebuerto" de Berisso y EET N°6 "Alberth Thomas" generando el espacio que permite a los alumnos de los años superiores 5º y 6º de las carreras técnicas, avisorar las potencialidades de un futuro estudio y trabajo en el ámbito de la ingeniería que no les sea ajeno e inalcanzable, familiarizándolos a través de las actividades pautadas con las incumbencias del ingeniero y su actividad diaria, vinculándolos con el pensamiento y criterios profesionales adquiridos a través de la experiencia, acercándolos al uso del equipamiento y los principios que los rigen despertando la curiosidad, el entendimiento y alcance de los mismos.

La idea de involucrar alumnos en la etapa intermedia avanzada de las carreras técnicas es que les permitan madurar los conocimientos y metodologías adquiridos para implementarlas a criteriosamente.

El trabajo propuesto es de construir un cohete de agua a ser lanzado exitosamente para lograr los objetivos de alcanzar la máxima distancia horizontal posible, evaluar adecuadamente dicha magnitud en forma teórica de modo de alcanzar la mayor precisión posible entre los datos obtenidos analíticamente y los medidos durante la experiencia.

Se busca pues lograr los siguientes objetivos.

- Competencia entre escuelas técnicas: Cohetes etapa simple que buscarán alcanzar la máxima distancia posible, evaluando adecuadamente dicha magnitud en forma teórica de modo de alcanzar la mayor precisión posible entre los datos obtenidos analíticamente y los medidos durante la experiencia y estimar el coeficiente de resistencia. (1er semestre del año)
- Objetivo conjunto entre las escuelas técnicas desarrollar un cohete multi etapa buscando alcanzar la máxima distancia posible con la última etapa del cohete mediante una separación exitosa controlada y su recuperación. Evaluar adecuadamente dicha magnitud en forma teórica de modo de alcanzar la mayor precisión posible entre los datos obtenidos analíticamente y los medidos durante la experiencia. Buscar el modo de censar la máxima altura que es capaz de lograr. (2do semestre del año)

En el primer semestre del año los alumnos construyen un cohete por grupo de modo tal que cada grupo tiene una única oportunidad de lanzar su cohete. En la que todos compiten para lograr la máxima distancia posible, el mayor tiempo de vuelo posible y a su vez buscan la mayor precisión entre los valores estimados analíticamente mediante modelos simplificados y los valores medidos en la experiencia.

Los jurados evalúan los aspectos considerados como objetivos y asignan un orden de mérito para cada uno de ellos de modo tal que quienes logran la mayor distancia resultan ganadores y los que logran el menor error entre los valores estimados analíticamente y medidos son los segundos debiendo presentar un informe una semana antes al menos de la fecha fijada para la experimentación con los datos correspondientes del cohete. El mismo



debe incluir una memoria de cálculo de cómo se determinan las características y configuraciones óptimas de su vehículo cohete, así como la conclusión final de que distancia alcanza, cuánto tiempo dura el vuelo y el valor de Cd (coeficiente de resistencia) estimado. Los ganadores del objetivo planteado para el primer semestre pueden decidir sobre qué área del proyecto en conjunto desean trabajar para poder repartir el resto de las tareas entre las escuelas restantes.

En el segundo semestre del año los alumnos de las tres escuelas técnicas se dividen responsabilidades sobre un proyecto común de construir un cohete multi etapa con sistema de recuperación y censado de altura con el objetivo de que cada una de las escuelas se circunscriba a una parte de un proyecto que a su vez es parte de un todo, lo que fomenta el trabajo en equipo y las tareas de integración tan comunes en ingeniería a su vez buscan la forma de predecir las trayectorias de ambas etapas. El trabajo fue estructurado siguiendo los objetivos planteados cronológicamente a saber:

### **1- Planteamiento de la problemática y el objetivo a alcanzar. Consolidación de las herramientas teóricas, modelo analítico, y abordaje matemático.**

Se realizaron encuentros en el Laboratorio de Fluidodinámica del departamento de Aeronáutica donde se abordó la física que envuelve al problema, las ecuaciones no lineales de la dinámica de cohetes con masa variable y el cómo resolver el problema linealizado las ecuaciones que se presentan a continuación para mayor facilidad. Dado que en la dirección del movimiento la ecuación que gobierna la dinámica está dada por:

$$m\ddot{x}' = E - D - mg \sin \alpha_o \quad (1)$$

Donde el drag (D) o resistencia aerodinámica a su vez es función de la velocidad desarrollada por el cohete según la expresión  $\frac{1}{2}\rho_{atm}\dot{x}'^2 C_d A_t$ , el empuje (E) depende de la velocidad de salida del chorro de agua que varía con el cambio de la presión interna a medida que pasa el tiempo según la expresión  $\rho_w V_s^2 A_s$  y finalmente el peso también se ve afectado conforme se produzca el vaciado de la botella afectando el término  $mg \sin \alpha_o$ , convirtiendo a (1) en una ecuación diferencial de segundo orden no homogénea de coeficientes no constantes. La no linealidad del problema de dinámica presentado por el cohete de agua y el acoplamiento de las variables en las ecuaciones que lo gobiernan hacen que sea sumamente propicio también para introducir métodos numéricos de cálculo y simulación y, la corroboración de su validez mediante la experimentación.

### **2- Estudio por simulación y estimación de parámetros teóricos.**

Una vez estudiado el problema se introdujeron clases en aula virtual para el abordaje del problema mediante el uso de computadora para poder simular tanto el comportamiento del cohete en todas sus fases como el de los parámetros másicos y dinámicos durante la etapa de empuje mediante software Openrocket y Excel respectivamente.

### **3- Construcción y determinación de características aerodinámicas.**

Los alumnos fueron instruidos en la construcción de prototipos que fueron evaluados en el túnel de vientos para determinar sus propiedades aerodinámicas, actividad que les permitió ponerse en contacto no solo con el uso de vientos sino además con el uso y método de calibración de balanzas de dos componentes, placas adquisidoras, software labview y finalmente relevamiento y post procesamiento de datos



Figura1: Ensayo en túnel de viento cohetes con uso de balanza y acondicionador de señal.

**4- Estudio banco de pruebas estático para medición de empuje y en túnel de viento para determinación de resistencia**

Nuevamente los alumnos fueron instruidos en la construcción de prototipos de motores sin aptitudes aerodinámicas presentes que permitieran relevar en el banco de ensayos estáticos de la facultad, la performance alcanzada por sus prototipos y comparación de los mismos familiarizándose nuevamente con el uso de celdas de carga, placas adquisidoras, así como también sistemas neumáticos de liberación y control remoto, así como nuevamente usaron el software labview para el relevamiento y post procesado de datos de empuje. Para obtener una referencia de la variación del empuje en el tiempo se utiliza a modo de aproximación una curva propia que se obtiene a partir de ensayo estático en banco para cada cohete.

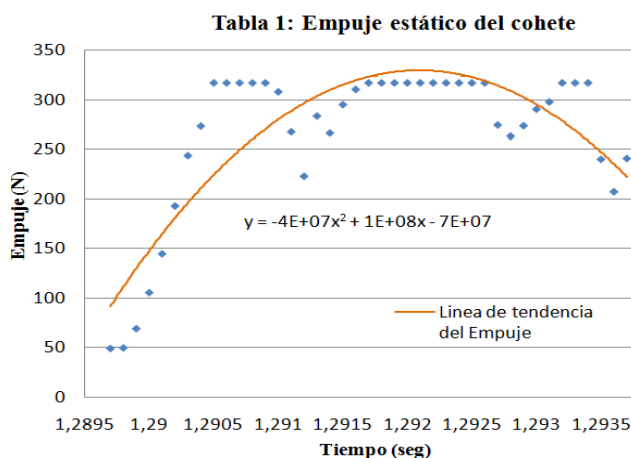


Figura 2: Banco ensayo estático y resultado de un ensayo de empuje tipo

**5- Comparación de resultados entre los diversos métodos de simulación y los experimentales.**

**6- Prueba en Campo**

**7- Conclusiones**

Un uso adecuado de los recursos como el agua considerado a criterio de cada equipo el determinar el volumen óptimo del mismo y sus implicancias. El combustible es únicamente agua sin ningún tipo de aditivo.

La presión suministrada queda estipulada por de cada equipo pero con una restricción de la presión máxima a que someterá su cohete considerando que el tope máx. admisible lo fijarán los jurados en función de la seguridad de la experiencia y de la resistencia mecánica del material utilizado y no pudiendo superar los 700KPa.

Finamente el ángulo de inclinación respecto del cenit es otra variable a contemplar por los equipos de modo tal que garantice el cumplimiento de los objetivos de maximizar la distancia y el tiempo de vuelo, Así como la configuración aerodinámica del mismo será potestad de los equipos fijando las características que brinden estabilidad en vuelo al cohete y la menor resistencia, como ser forma de la cofia, tipo y cantidad de aletas y posición de las mismas, relación L/D del modelo, materiales utilizados, etc.

Los requerimientos y limitaciones impuestas al problema de diseño y construcción son, entre otros propios de los procesos de manufactura, la utilización de botellas plásticas (PET) con restricción de volumen máximo.

Uso de materiales plásticos, poliméricos, cartón, papel, telas, pinturas, adhesivos vinílicos, epoxídicos, masilla, hilos, cintas adhesivas.

Los valores medios de escape y velocidad del cohete se usan para determinar los valores para el volumen de aire comprimido y la presión, la velocidad del chorro, y la aceleración inercial en una discretización del modelo físico en pequeños pasos de tiempo en la etapa de empuje. Lo que permite actualizar la velocidad, aceleración y altitud del cohete al final del periodo de empuje y así hallar las condiciones iniciales del período de balística.

Una vez que el período de empuje ha terminado, el cohete se halla en régimen de vuelo balístico. A partir de aquí el empuje ha dejado de actuar por lo cual la ecuación (1) se reduce a:

$$m_e \ddot{x}^j = -\frac{1}{2} \rho_{atm} V_c^2 C_d A_t - m_e g \sin \alpha_i \quad (2)$$

La presencia en el medio de un fluido como el aire, ejerce una fuerza de rozamiento sobre el cohete, que depende del módulo de la velocidad y cuyo sentido es opuesto a esta.

En esas condiciones, el movimiento de una partícula en un campo gravitatorio uniforme no sigue estrictamente una parábola y es sólo casi-parabólico, pero dadas las características del movimiento dicha aproximación es válida. A las velocidades desarrolladas, el flujo es predominantemente turbulento produciéndose remolinos y presiones que generan una fuerza de frenado proporcional al cuadrado de la velocidad.

Para esas ecuaciones la trayectoria resulta de integrar las ecuaciones diferenciales precedentes obteniendo unas ecuaciones de balística con rozamiento que resultan en un tiro cuasi parabólico a partir de las condiciones iniciales halladas al final de l periodo de empuje. La solución de estas ecuaciones con las condiciones iniciales  $t=0$ ,  $v_x=v_{0x}$ ,  $v_y=v_0$ .

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= v_{0x} \exp(-bt) \\ \frac{dy}{dt} &= \left( \frac{g}{b} + v_{0y} \right) \exp(-bt) - \frac{g}{b} \end{aligned} \quad (3)$$

Para un proyectil disparado con velocidad  $v_0$  y ángulo de tiro  $\theta$ . Las velocidades iniciales son  $v_{0x}=v_0 \cdot \cos \theta$ ,  $v_{0y}=v_0 \cdot \sin \theta$ . A modo de ejemplo para una trayectoria en la cual no se

consideran la componente de  $g$  por estar ésta contenida siempre en el eje de referencia y se llega a una expresión similar a la siguiente:

$$\begin{aligned}x &= \frac{v_{0x}}{b} (1 - \exp(-bt)) \\y &= \frac{1}{b} \left( \frac{g}{b} + v_{0y} \right) (1 - \exp(-bt)) - \frac{g}{b} t\end{aligned}\quad (4)$$

Anulando el parámetro tiempo de estas dos ecuaciones y asignando el valor final de “ $y$ ” puede despejarse el alcance “ $x$ ” del proyectil. Habiendo hecho todas estas consideraciones y experiencias antes del ensayo final, se presenta el Informe con una semana de antelación al menos de la fecha fijada para la experimentación y con la hoja final de estimaciones completa entre los que se declaran las características del cohete y la performance que espera alcanzar.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Lo alumnos aprenden que un cohete aerodinámicamente estable volará con su “nariz” por delante y mostrará una trayectoria de arco suave como la de la figura 4.

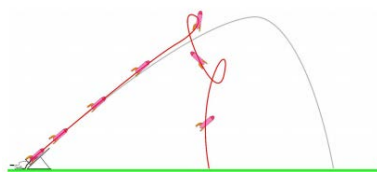


Figura 3: trayectoria de vuelo inestable

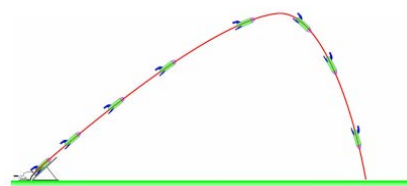


Figura 4 trayectoria de vuelo estable

Los alumnos demuestran gran interés, entusiasmo y proactividad a pesar de la barrera matemática que los separa del mundo universitario y cuentan con gran apoyo y empuje de sus docentes de ciencias físico matemáticas para salvar cualquier distancia que puedan encontrar para la solución de las problemáticas presentadas.

Si bien los alumnos cuentan con instalaciones de reciente modernización no tenían una chance concreta de proyectar un problema y resolverlo con el uso de celdas de carga túnel de viento y demás equipamiento provistos por la facultad para a experiencia.

## CONCLUSIONES

El principal interés en aplicar esta metodología de enseñanza es la propia inquietud generada en el alumnado que ve por primera vez en muchos casos en sus estudios en que pueden cuantificar, analizar y ver plasmados en los resultados de la experiencia todos los conceptos vistos en un curso, midiendo resultados esperados, fruto de su anteproyecto y las implicancias de las decisiones tomadas en el proceso.

Queda mucho trabajo por desarrollar en lo que respecta sistema de liberación óptimos, configuraciones multibotellas y multietapa. Que quedaron relegados por falta de tiempos al segundo año de trabajo.

Respecto de los modelos, que se puedan implementar para resolver la dinámica del problema, ya han surgido discusiones y alternativas de cálculo a las presentadas buscando además ponderar en que etapa del desarrollo es deseable profundizar el análisis del modelo.

Así mismo será un desafío a futuro coordinar las tareas grupales con un objetivo común así como las salidas a campo para prueba, puesto que las salidas por institución presentan ciertas limitaciones que deberán ser salvadas con una agenda de actividades pautada con mucha antelación.



Figura 5: Prototipos de Modelos multietapa que ensayan y buscan su puesta a punto sirviendo de modelo a las escuelas técnicas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Joseph M. Prusa, Hydrodynamics of a Water Rocket SIAM Review Vol 42, N°4 pp.719-726  
<http://www.siam.org/journals/sirev/42-4/34822.html>
- M de Podesta. [http://www.npl.co.uk/upload/pdf/wr\\_booklet\\_print.pdf](http://www.npl.co.uk/upload/pdf/wr_booklet_print.pdf)
- Estimación de trayectoria y tiempo de vuelo de un Cohete de Agua, Trabajo Integrador - Mecánica de Fluidos - A0052 – Año 2013.
- Estimación de trayectoria y tiempo de vuelo de un Cohete de Agua, Trabajo Integrador - Mecánica de Fluidos - A0052 – Año 2016
- Aircommander

Trabajo anterior vinculado presentado en:

- CAIA 3



## ESTUDIO EXPERIMENTAL DE EFECTOS AEROELÁSTICOS EN ALAS FLEXIBLES EN FLUJO TURBULENTO Y DE BAJA VELOCIDAD

Gamarra, Ariel N.<sup>a</sup> y GarcíaSaíenz, Mariano<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>UIDETLaCLyFA (Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental)  
 Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería UNLP, 116 e 47 y 48 s/n  
<sup>b</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas  
[ariel.gamarra@ing.unlp.edu.ar](mailto:ariel.gamarra@ing.unlp.edu.ar)

### INTRODUCCION

El fenómeno analizado en este trabajo es el flutter, el mismo se caracteriza por ser una inestabilidad dinámica que ocurre por interacción entre fuerzas aerodinámicas no estacionarias, fuerzas elásticas y de inercia. Dicho fenómeno ocurre a cierta velocidad de vuelo y posee una frecuencia de oscilación específica definida por la interacción aeroelástica entre el flujo y la estructura.

En el año 1935 T. Theodorsen[1] desarrolló una teoría analítica que define las ecuaciones que gobiernan el movimiento de un ala en flutter para 3 grados de libertad (movimiento vertical, cabeceo y giro del comando) a partir del desarrollo de las ecuaciones de Lagrange en cada grado de libertad. Además en dicho trabajo introdujo una fórmula para determinar las fuerzas aerodinámicas durante el desarrollo del fenómeno.

El objetivo de este trabajo es validar una herramienta analítica para predecir el fenómeno de flutter en alas utilizando la teoría antes mencionada, y desarrollar las prácticas y procedimientos experimentales para el estudio del flutter en túnel aerodinámico. Con el modelo ya construido se verificará la velocidad de ocurrencia y frecuencia de flutter mediante ensayo en un túnel de viento turbulento.

### ANÁLISIS TEÓRICO

#### Modelo estructural

J. Garrick y T. Theodorsen[ 2] al haber realizado cálculos de flutter a una serie de alas y verificaciones mediante ensayos de las mismas, llegaron a la conclusión que las características aeroelásticas en términos de la velocidad de viento y la frecuencia de oscilación del perfil situado al ¾ de la semienvergadura, eran muy próximas a las obtenidas para el ala completa. Por ello el modelo analítico corresponde a dicho perfil, reemplazando la acción del resto del ala mediante un resorte de torsión y uno de flexión, como se observa en la Figura 1.

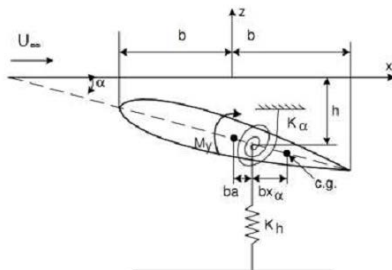


Figura 1. Modelización del ala para el estudio de flutter.

Se plantean las ecuaciones de Lagrange para dos grados de libertad, el desplazamiento vertical "h" y el giro alrededor del centro elástico "α". A través de las mismas, se llega a las ecuaciones de movimiento para los grados de libertad mencionados(1):

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & I_1 \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{h}} + \begin{bmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{h}} + \begin{bmatrix} M w_1 h^2 & (M w_1 h^2 g_1 h) / w \\ 0 & I_1 \alpha \end{bmatrix} \mathbf{h} = -L(\alpha) \quad \begin{bmatrix} I_1 \alpha \ddot{\alpha} + S_2 \dot{\alpha} + \dots \end{bmatrix}$$



)

### Modelo aerodinámico

Para obtener la fuerza de sustentación(2) y el momento aerodinámico(3) se utiliza el modelo de Theodorsen; el mismo expresa dichas fuerzas a través de una función de transferencia C(k).

$$L = \rho b^2 (U_\infty \pi \dot{\alpha} + \pi \dot{h} - \pi b a \ddot{\alpha}) + 2\pi \rho U_\infty b C(k) \left[ U_\infty \alpha + \dot{h} + b \left( \frac{1}{2} - a \right) \dot{\alpha} \right] \quad (2)$$

$$M_\alpha = -\rho b^2 \left[ \pi \left( \frac{1}{2} - a \right) U_\infty b \dot{\alpha} + \pi b^2 \left( \frac{1}{8} + a^2 \right) \ddot{\alpha} - \pi b \dot{h} \right] + 2\rho U_\infty b^2 \pi \left( a + \frac{1}{2} \right) C(k) \left[ U_\infty \alpha + \dot{h} + b \left( \frac{1}{2} - a \right) \dot{\alpha} \right] \quad (3)$$

Donde C(k) es un número complejo con parte real “F(k)” y parte imaginaria “G(k)”. Ambas partes dependen de  $k \left( k = \frac{w \cdot b}{U} \right)$  que se define como frecuencia reducida del fenómeno. En la Figura 2 se observa dicha función C(k).

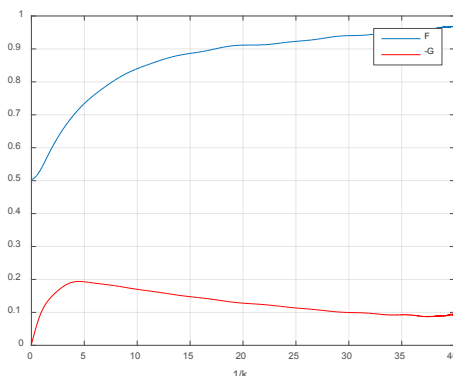


Figura 2. Función C(k).

### Resolución analítica

Se suponen soluciones del tipo armónico para ambas coordenadas con la misma frecuencia; se llega a un sistema matricial como el siguiente(4);

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ h_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Para que el sistema no posea solución trivial, el determinante del mismo debe ser igual a cero. Al calcular dicho determinante se obtiene un número imaginario. Para resolver el sistema se introduce un nuevo parámetro “X” que posee la siguiente forma (5);

$$X = \frac{r_\alpha^2}{\mu} \left( \frac{w_\alpha}{w} \right)^2 \quad (5)$$

Al resolver el determinante se llega a dos ecuaciones de segundo grado para la parte real(6) y la parte imaginaria (7) del número mencionado; para que sean solución del sistema ambas partes deben ser igual a cero:

Parte real

$$Re = \Omega_h \Omega_\alpha (1 - g_h g_\alpha) X^2 + [\Omega_h (R_{\alpha\alpha} - g_h I_{\alpha\alpha}) + \Omega_\alpha (R_{ch} - g_\alpha I_{ch})] X + \frac{A_1 B_1 2G}{\mu} + \frac{C_1 2F}{\mu^2} = 0 \quad (6)$$

Parte imaginaria

$$Im = \Omega_h \Omega_\alpha (g_h + g_\alpha) X^2 + [\Omega_h (R_{\alpha\alpha} g_h + I_{\alpha\alpha}) + \Omega_\alpha (R_{ch} g_\alpha + I_{ch})] X + \frac{1}{\mu} \left( D_1 + \frac{C_1 2G}{\mu} - B_1 2F \right) = 0 \quad (7)$$

Donde los parámetros no mencionados son operaciones matemáticas del sistema [2].

Para resolver el sistema se asume un rango de valores positivos de  $k$  y se calculan los valores de  $X$  correspondientes en ambos casos. Se grafican los resultados de  $\sqrt{X}$  vs  $1/k$ , y se identifica el momento en que ambas raíces son iguales.

Con ese punto se calcula la velocidad de flutter mediante la relación (8).

$$V_f = \frac{r_\alpha w_\alpha b}{\sqrt{\mu}} \frac{1}{k \sqrt{X}} \quad (8)$$

Con dicha velocidad y frecuencia reducida se calcula la frecuencia del fenómeno de flutter.

## METODOLOGÍA

### Modelos experimentales

El primer modelo consistía en una placa de 2mm x 83mm x 350mm, tamaño de una placa comercial disponible en el mercado. Las propiedades del material se obtuvieron del "Wood Handbook: Wood as an Engineering Material"[4].

Las frecuencias de los primeros modos de vibrar del modelo, se obtuvieron inicialmente mediante un software de elementos finitos (FEM). En el mismo se identifican los dos primeros modos, uno de flexión y uno de torsión. En la Figura 3 se ven los datos arrojados para el primer modelo.

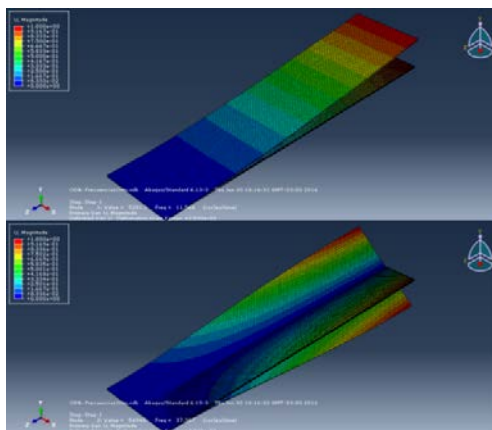


Figura 3. FEM placa plana 2mm.

Se verificó el primer modo de la placa plana realizando un ensayo simple que consistía en desplazar la punta del ala para hacerla oscilar libremente y se registra la señal de un acelerómetro convenientemente ubicado en el modelo. Se observó una diferencia respecto a los resultados FEM, por lo que se optó por utilizar la frecuencia obtenida en el experimento. El modo torsional no pudo ser verificado correctamente mediante el ensayo experimental debido a la dificultad de excitar adecuadamente dicho modo.

Como segundo y tercer modelo se eligieron placas planas con la misma geometría que el caso anterior, pero colocándoles refuerzos longitudinales y diagonales con el fin de aumentar la rigidez flexional y torsional, sucesivamente. Al igual que en el caso anterior se obtuvieron las frecuencias de los primeros modos y se verificaron experimentalmente para cada caso.

Una vez obtenida una buena caracterización de las placas planas y en función de los resultados obtenidos, en los que se evidenció la influencia de la frecuencia de torsión en la definición de la frecuencia de flutter, se construyeron alas rectangulares procurando minimizar la rigidez torsional. Se construyeron dos alas rectangulares con perfil NACA 0009 sin torsión geométrica, que posee seis partes principales, como se observa en la Figura 4.



Figura 4. Configuración del ala con el larguero al 40% de la cuerda.

En el primer modelo de ala se colocó el larguero principal al 50% de la cuerda, el centro de gravedad y de giro coincidían con el mismo (fue verificado experimentalmente). Para la segunda ala se adelantó la posición del larguero principal al 40% de la cuerda, casi en coincidencia con el centro de gravedad de las costillas. En ambos modelos el empotramiento se realizó únicamente sobre el larguero principal.

Al igual que en las placas planas se realizó un FEM para obtener las frecuencias de los primeros modos de vibrar, al igual que en los casos anteriores. Se observó un primer modo de flexión y un segundo de torsión.

### 1.1. Ensayos y adquisición de datos

Se realizaron pruebas en un túnel de viento cerrado con una sección de prueba rectangular de 1.4m x 1.0m x 7.5m, que posee un rango de velocidades de 0 a 20 m/s. se colocaron los modelos de forma que los mismos queden coincidentes con el centro de la sección de prueba para evitar los efectos de pared. Dichos modelos se sujetaron por la raíz mediante un empotramiento.

Para observar la ocurrencia de flutter, se aumenta la velocidad de viento progresivamente hasta que el fenómeno se establece. Al estar limitados en la velocidad máxima del túnel, los modelos se diseñan para lograr propiedades másicas e inerciales que favorezcan la ocurrencia de flutter dentro de los límites operativos del túnel de viento disponible. Esto provoca que el fenómeno sea muy sensible a la colocación de sensores (acelerómetros, tomas de presión, etc.), por ello para los primeros ensayos (de placas planas) se optó por utilizar un método de medición de frecuencia de flutter no invasivo. Se realizaron grabaciones de alta velocidad (a 420 cuadros por segundo) de la punta del ala y mediante un software de seguimientos de puntos denominado "tracker", se realizó un mapeo de puntos esenciales para poder observar el fenómeno (trackeo), y mediante técnicas de análisis de señales se encontraron las frecuencias dominantes del fenómeno. Este procedimiento fue validado mediante comparación con resultados de acelerómetros para identificación de frecuencia.

En los últimos ensayos, además del sistema de filmación, se colocaron acelerómetros y sensores de vibraciones de baja masa minimizando la influencia sobre las características del modelo en estudio.

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Tabla 1 se presentan los resultados arrojados por el programa de elementos finitos para todos los modelos.

Tabla 1. Frecuencias naturales de los modelos, según FEM.

	Flexión [Hz]	Torsión [Hz]
Placa plana	11,88	48,05
Placa plana ref. longitudinal	27,2	59,2
Placa plana ref. torsional	22,87	74,87
Ala larguero 50%	4,66	21,59
Ala larguero 40%	4,59	19,4

Para identificar la frecuencia dominante del fenómeno aeroelástico, se computa el espectro de frecuencia de las señales de desplazamiento y de ángulo de ataque, obtenidas mediante el trackeo de puntos en los videos de alta velocidad en filmaciones de 20s aproximadamente.

En los ensayos se realiza un seguimiento del borde ataque, de fuga y el centro de la cuerda de la puntera de ala; se calcula el ángulo de giro suponiendo que la cuerda no se deformaba (verificado experimentalmente). En la Figura 5, a modo de ejemplo de lo obtenido se observa el espectro de frecuencia de la placa plana para los dos grados de libertad.

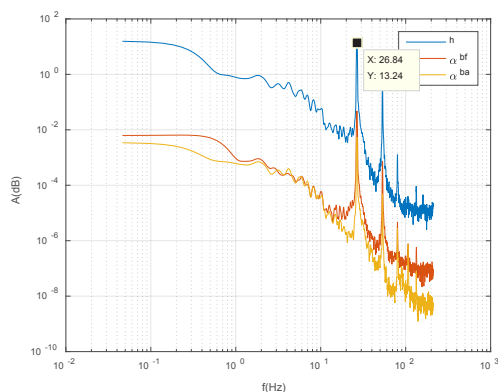


Figura 5. Espectro de frecuencia del modelo de placa plana.

En el caso del ala con el larguero al 50% además de hacerle el seguimiento de imágenes, se le colocó un acelerómetro uniaxial en la punta del ala coincidente con el larguero principal, con el objetivo de comparar los resultados arrojadas por el seguimiento de imágenes. En la Figura 6 se observa el espectro de frecuencia de la señal de desplazamiento obtenida por el seguimiento de imágenes y la arrojada por el acelerómetro.

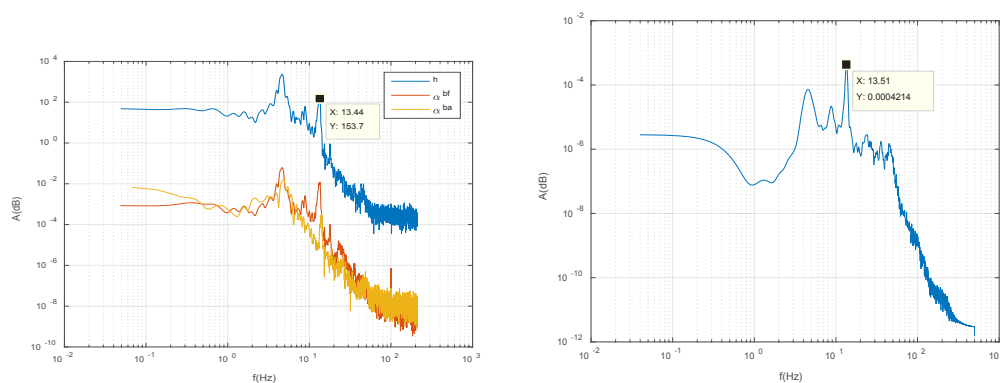


Figura 6. Espectro de frecuencia, modelo de ala con larguero al 50% de la cuerda.

El último ensayo fue sobre el ala con el larguero al 40% de la cuerda, instrumentada con acelerómetro coincidente con el larguero principal y además se colocaron dos sensores de vibraciones con el objetivo de obtener la frecuencia torsional. En la Figura 7 se observa el gráfico del espectro de frecuencias de la señal de desplazamiento obtenida por el seguimiento de imágenes, y la arrojada por las señales de aceleraciones verticales (larguero principal en puntera de ala) y por la vibración del borde de fuga (torsional).

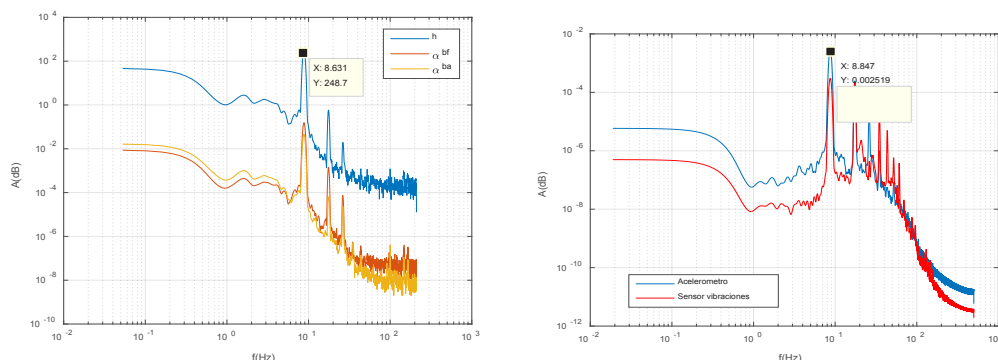


Figura 7. Espectro de frecuencia, modelo de ala con larguero al 40% de la cuerda.

Como resumen, se presenta la Tabla 2 con los resultados de los ensayos detallados anteriormente.

Tabla 2. Resultados globales.

	V teórica [m/s]	V experimental[m/s]	e[%]
Placa Plana	10	9	10
Placa Plana ref. longitudinal	11,5	12	4,2
Placa Plana ref. torsional	15,7	14	10,8
Ala larguero central	10,8	10	7,4
Ala larguero 40%	9,9	8	19,2
	F teórica [m/s]	F experimental[m/s]	e[%]
Placa Plana	22,3	26,6	16,2
Placa Plana ref. longitudinal	29,5	39	24,4
Placa Plana ref. torsional	34	42,6	20,2
Ala larguero central	12,3	13,6	9,6
Ala larguero 40%	9,22	8,8	4,56

## CONCLUSIONES

El fenómeno es muy sensible a las frecuencias propias del modelo (en especial la torsional) por ello una de las principales fuentes de error es el cálculo de las mismas. Para obtener una mejor aproximación de los modos sería necesario realizar ensayos modales de los modelos construidos.

A los modelos de alas se les realizaron sucesivos ensayos, verificando la independencia de la velocidad y frecuencia de flutter respecto al ángulo de incidencia inicial.

Considerando que el modelo de ala fue diseñado y construido para favorecer la ocurrencia de flutter de acuerdo a los requerimientos y limitaciones del ensayo, se observa que el error relativo entre los cálculos analíticos y los resultados experimentales en la determinación de los parámetros de flutteres relativamente bajo (menor al 10%) y podría mejorarse notablemente con la incorporación de resultados de ensayos modales.

Como conclusión final se pudo cumplir con el objetivo deseado de ser capaces de diseñar un ala que reproduzca el fenómeno aeroelástico (flutter) a bajas velocidades y poder predecir dicho comportamiento, validando las herramientas analíticas y experimentales que responden al modelo teórico aceptado para el análisis de estos fenómenos aeroelásticos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Theodorsen Theodore: General Theory of Aerodynamic Instability and the Mechanism of Flutter. T. R. N°496, NACA, 1935.
- [2] Theodorsen T., y Garrick I. E., Mechanism of Flutter: a Theoretical and Experimental Investigation of the Flutter Problem, T. R. 685, NACA, 1940.
- [3] Garcia Fogeda P. y López Díez J., Apuntes de aeroelasticidad, ETSIA, 1992.
- [4] Forest Products Laboratory, Wood Handbook: Wood as an Engineering Material, FPL-GTR-113, USDA Forest Service, Wisconsin, 1999.

## CARGAS AERODINÁMICAS DE PLACA PLANA BAJO MOVIMIENTO DE CABECEO PURO ANTE FLUJO TURBULENTO

Santiago Algozino<sup>a,b</sup>, Julio Marañón Di Leo<sup>a,b</sup>, Juan S. Delnero<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>UIDET-LaCLyFA, Dpto. Aeronáutica, Fac. Ing., U.N.L.P – Calle 116 e/ 47 y 48 – CP: 1900 – La Plata, Buenos Aires, Argentina.

<sup>b</sup>CONICET, Avda. Rivadavia 1917, C1033AAJ, Ciudad. de Buenos Aires, Argentina.  
[santiago.algozino@ing.unlp.edu.ar](mailto:santiago.algozino@ing.unlp.edu.ar)

### INTRODUCCIÓN

Debido a la implementación de micro-vehículos aéreos comandados a distancia o autónomos, el estudio del fenómeno de aleteo tomó mayor relevancia debido a la posibilidad de generar grandes fuerzas aerodinámicas con pequeñas superficies [1]. Dados los pequeños tamaños de las alas y bajas velocidades de vuelo, los números de Reynolds son muy bajos por lo que el flujo presenta condiciones inestables y de gran complejidad.

Con el aumento de la capacidad de cómputo, han sido realizadas mediante simulaciones numéricas importantes avances para poder comprender el desarrollo del campo fluidodinámico en situaciones donde un ala se mueve a distintas frecuencias y siguiendo distintos patrones de movimiento. Mediante técnicas de PIV (particle image velocimetry), los ensayos experimentales han podido brindar mucha información sobre el campo fluidodinámico, y a su vez, como método de validación de las diferentes simulaciones numéricas. Últimamente se ha intentado normalizar los movimientos impuestos en las alas durante los distintos ensayos [2,3]. De esta forma, se logró llegar a un acuerdo de los movimientos patrones (rampa transitoria, movimiento continuo sinusoidal modificado) para la comparación de resultados en marco de movimientos de cabeceo de perfiles aerodinámicos. En dichos trabajos, primero se establecieron movimientos canónicos (o tipos) en los cuales se iban a analizar los efectos de cabeceo de un perfil (cambio brusco en el ángulo de ataque). En dicho caso se definió una función rampa transitoria y una función de rampa ida, pausa y rampa vuelta, ambas suavizadas por una función  $C^\infty$  desarrollada por Eldredge [4], con el fin de minimizar los picos en la aceleración angular y de esa forma minimizar los valores de fuerzas inerciales. Además con dicha función se minimizan las vibraciones en los modelos experimentales y las inestabilidades matemáticas en las simulaciones numéricas. En los resultados presentados en [2] y [3], que resulta de la comparación entre múltiples ensayos realizados en distintos institutos de todo el mundo, se encontró que el número de Reynolds no tiene gran efecto dentro del rango de  $O(3)$  y  $O(4)$ . Otro punto importante a destacar es que la posición del punto de pivot y la velocidad de rotación se pueden sumar linealmente en el problema global, lo cual condice con la teoría clásica de perfiles no estacionarios. Si bien se avanzó mucho en estos últimos años en la temática, en todos los ensayos realizados la intensidad de turbulencia de los túneles de viento eran de una magnitud menor a 0,3 o 0,4 %, lo cual se contradice con la zona de operación de este tipo de aeronaves, ya que las mismas están pensadas para operar en zonas de baja altitud donde la baja capa límite atmosférica tiene gran influencia (altos valores de intensidad de turbulencia). Al volar en estas condiciones, estos vehículos están propensos a vientos rachados (ráfagas) así como altos niveles de turbulencia. Watkins et al. [5] y Mohamed et al. [6] realizaron una investigación intensiva sobre el estado del arte que involucra la capa límite turbulenta y la posible influencia sobre los pequeños vehículos aéreos no tripulados. Otras investigaciones realizadas, analizan la influencia de la turbulencia en la pérdida dinámica donde se ha encontrado una gran influencia de la turbulencia en la zona de transición laminar-turbulenta, que produce diferentes vórtices de borde de ataque y de borde de fuga.

Siguiendo esta línea, se están realizando ensayos en túnel de viento de la UIDET-LaCLyFA de una placa plana con capacidades de realizar movimiento de cabeceo puro para



generar los movimientos canónicos descritos anteriormente. El objetivo final radica en comparar los resultados obtenidos con otros autores para tener una base de resultados confiables, para luego realizar modificaciones en la turbulencia de la corriente libre incidente así poder analizar los efectos de la misma en la aerodinámica no estacionaria.

## METODOLOGÍA

Utilizando el túnel de viento de circuito abierto del UIDET-LaCLyFA que cuenta con una sección de prueba de 0,4 x 0,4 metros y una velocidad máxima de 45 m/s, se implementó un sistema de movimiento de una placa plana de 0,1 m de cuerda por 0,4 m de envergadura para poder obtener un ala con extensión de pared a pared y así simular un perfil bidimensional, el cual está equipado con un sistema de polea multiplicadora (4 a 1 aproximadamente) que incrementa la precisión del motor paso a paso que mueve el sistema. Ver Figura 2. Entre la polea multiplicadora y el ala a ensayar se insertó mediante 2 acoples una balanza aerodinámica de dos componentes para poder medir los esfuerzos generados por el ala.

Como la balanza aerodinámica está preparada para medir los esfuerzos en dos sentidos, se la colocó de forma tal que siempre las fuerzas medidas sean normales a la placa plana y paralelas a lo largo de la cuerda, es decir, las fuerzas medidas no serán las de sustentación y resistencia, sino las mismas en una terna solidaria al cuerpo. Además, como el ala está rotando, cambia la componente del peso en el ala constantemente, lo que trae aparejado ciertos problemas que serán detallados en la sección de resultados.

Como primer ensayo, se realizaron mediciones del perfil de velocidades incidente para poder determinar los niveles mínimos de turbulencia con los cuales se podía ensayar y así determinar si son comparables con los de otros autores. Para ello se utilizó un anemómetro de temperatura constante (CTA DantecStreamline), con un sensor de dos canales (fiber film probes 55R51). La adquisición fue realizada a una frecuencia de muestreo de 2 kHz, usando un filtro pasa bajo a 1 kHz. Se adquirieron 16384 muestras en cada test y a las mediciones se realizaron los estudios estadísticos clásicos para poder determinar el perfil de velocidades y los niveles de turbulencia. En la Figura 1 se pueden observar las condiciones más relevantes para este trabajo. En la condición de velocidad incidente de 2 m/s, se puede observar cómo se obtiene un perfil de velocidades plano una vez despejado los primeros 5 cm de distancia respecto a la pared característico de los perfiles de velocidades turbulentos desarrollados. Además se observa la intensidad de turbulencia longitudinal, la cual es aproximadamente constante en un valor de 0,4%.

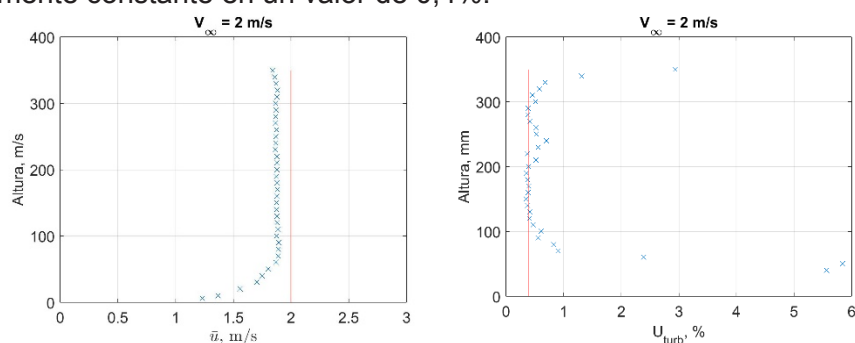


Figura 1. Perfil de velocidades incidente. A) Velocidades longitudinales ( $u$ ) media. B) Intensidad de turbulencia longitudinal

Luego de caracterizar el perfil de velocidades incidente, para las distintas velocidades de ensayo, se realizaron mediciones de las aceleraciones generadas en el movimiento del mecanismo y las vibraciones mecánicas que pueden estar presentes, para luego desestimar las mismas en las mediciones de fuerzas realizadas con balanza. Además, dependiendo de la frecuencia natural del sistema, y de la velocidad de viento incidente, se puede generar un efecto llamado “flutter” el cual consiste en una inestabilidad producida por el aire en el ala que se quiere evitar para que las mediciones puedan llevarse a cabo. Para ello se utilizaron dos acelerómetros tipo IEPE Isotron fijos en el borde de ataque y borde de fuga del extremo

más alejado al punto de montaje del ala. Se realizaron mediciones de dichas aceleraciones mediante un módulo de acelerómetros NI SCXI-1530 en un chasis NI SCXI-1000 con un conversor analógico digital de 16 bits NI SCXI-1520.



Figura 2. Montaje de ensayo en túnel de viento

## RESULTADOS

Las mediciones de aceleración se hicieron en primera medida para determinar las frecuencias naturales y luego se realizaron los mismos movimientos que se van a realizar para la medición de fuerzas con la balanza aerodinámica. En la Tabla 1 se puede observar el resumen de resultados obtenidos para las frecuencias naturales según los distintos puntos de pivot seleccionados (borde de ataque, cuarto de cuerda, y mitad de la cuerda). Además, se realizaron simulaciones numéricas mediante análisis de elementos finitos (FEM) utilizando el software SimuliaAbaqus, y en la misma tabla se pueden ver las comparaciones con las mediciones experimentales. Como se puede observar en dichos resultados, el error respecto a las simulaciones numéricas es bastante elevado (mayor al 10%) con lo cual se deberían corregir las restricciones de unión que se utilizaron en el software de elementos finitos para poder mejorar los resultados de dicha simulación. El objetivo de la simulación es el de poder obtener valores correctos de la frecuencia natural para poder estimar la frecuencia dominante del modo de rotación ya que de forma experimental es difícil medirlo, con lo cual si se tiene validado el primer modo de vibración, se puede considerar válido el de rotación obtenido por elementos finitos.

Con los resultados obtenidos en la simulación numérica, conociendo que se tiene un desvío importante, se obtuvieron las frecuencias característica de flutter así como la velocidad de viento a la cual ocurre dicho fenómeno, obteniendo que dichos valores son de órdenes de magnitud mayor respecto a las condiciones del ensayo, con lo cual se puede asegurar que no se va a generar dicho efecto sin necesidad de mejorar los resultados de la simulación por elementos finitos. Otro punto a destacar es que la respuesta de los dos acelerómetros está superpuesta en bajas frecuencias, es decir, no se observa una rotación del ala en torno al eje de pivot, lo cual era una condición necesaria para poder asegurar el ala como un elemento infinitamente rígido. Dichos resultados se pueden observar en la Figura 3 y Figura 4 donde se grafica las respuestas de los acelerómetros ante perturbaciones iniciales y la respuesta en frecuencia de dichas mediciones.

Tabla 1. Comparación entre elementos finitos y mediciones experimentales de la frecuencia natural.

<i>Punto de pivot en fracciones de cuerda</i>	<i>FEM</i> [Hz]	<i>Experimental</i> [Hz]	<i>Error</i> %
<i>0</i>	9.68	8.606	12
<i>0,25</i>	10.20	8.316	23
<i>0,5</i>	9.70	8.301	17

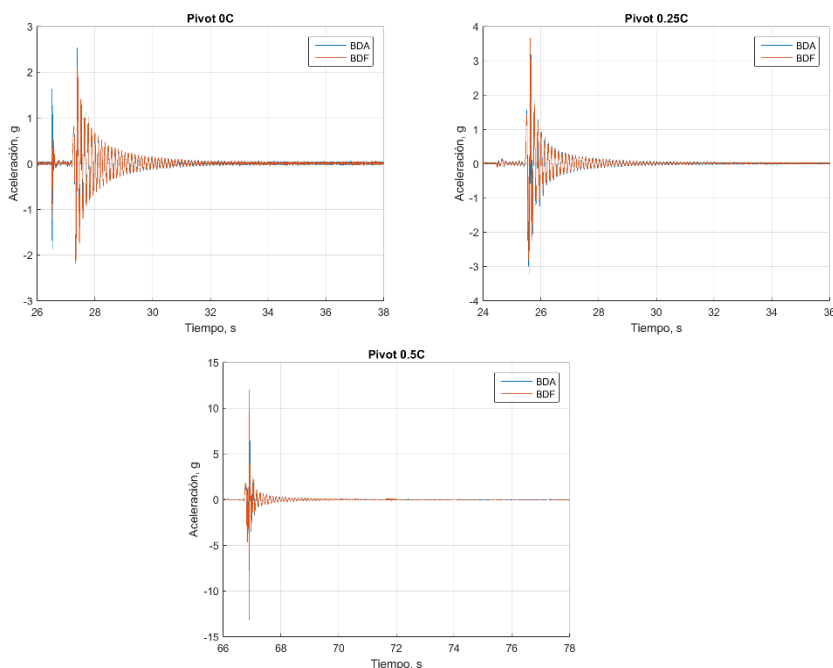


Figura 3. Respuesta de aceleración ante una perturbación inicial para los tres puntos de pivót.

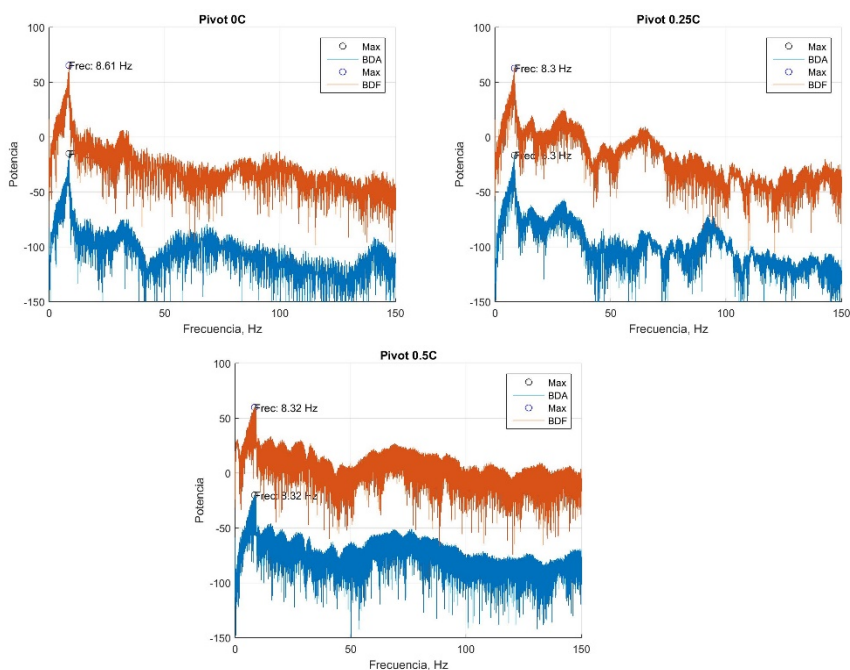


Figura 4. Espectros de densidad de potencia para los dos acelerómetros en los tres puntos de pivót

Luego de conocer estos resultados se procedió a realizar las mediciones con balanza aerodinámica para poder conocer los esfuerzos aerodinámicos. En primera medida, se realizó un “tarado estático” de la balanza, debido a que el ala, por su propio peso, genera deformaciones en la balanza que son medidas por las galgas extensiométricas, es por eso que primero se analizó cuanto mide la balanza para cada ángulo de rotación sin velocidad de corriente libre. Cabe destacar que al ser un ala en movimiento, la masa de la misma por la aceleración de rotación también genera un esfuerzo en la balanza, el cual no se está teniendo en cuenta por ahora, debido a que se debe generar un elemento de iguales propiedades másicas e inerciales que el ala pero que genere la menor cantidad de fuerza aerodinámica. De esta forma se puede separar los esfuerzos aerodinámicos de los

inerciales y así solo observar la historia de las fuerzas aerodinámicas durante el ensayo. Dichos ensayos se están realizando en este momento, por eso no se presentan esos resultados.

Se realizaron las mediciones con balanza para diferentes movimientos impuestos en el ala mediante el motor paso a paso. Los mismos representan los movimientos canónicos estipulados por otros autores referentes en el tema como fue comentado en la introducción de este trabajo. Debido a las capacidades del mecanismo, no se logró realizar mediciones para “altas” frecuencias, pero si se pueden determinar resultados para las denominadas “bajas” frecuencias. Los movimientos realizados para este trabajo se pueden observar en la Figura 5.

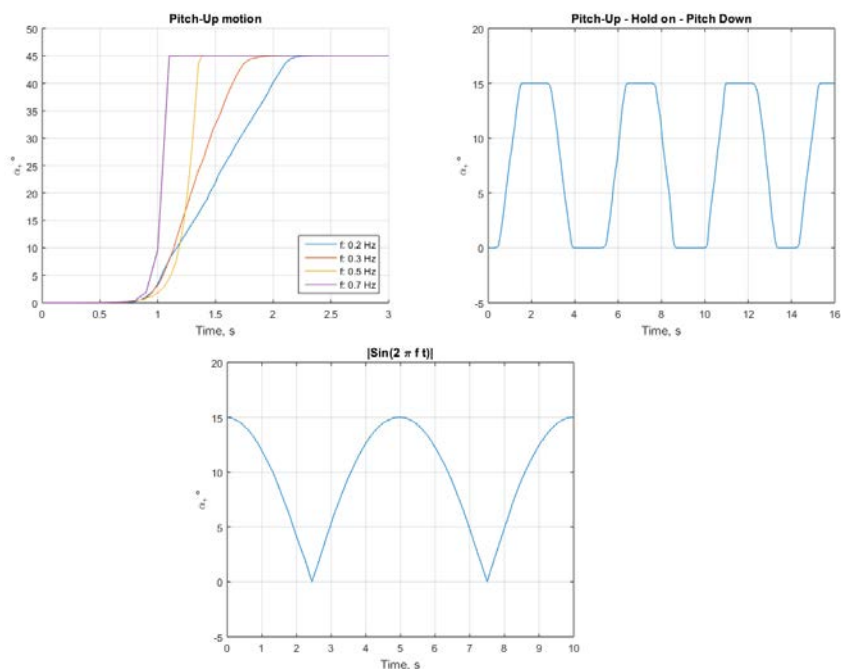
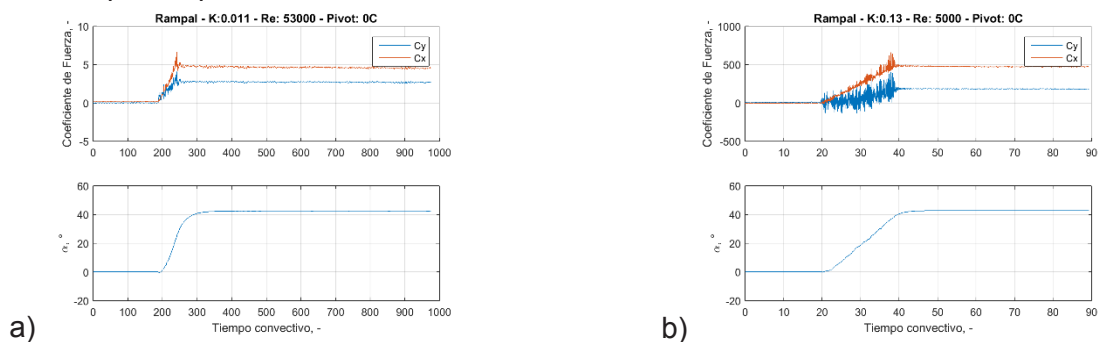


Figura 5. Movimientos realizados por el ala. A) Rampa ascendente. B) Movimiento rampa-espera-rampa. C) Valor absoluto del seno.

Con dichos movimientos se realizaron las diferentes mediciones con balanza aerodinámica, y en un pos-procesado, se restaron los valores obtenidos en el tarado para cada ángulo de cabeceo. Además. Se realizó la transformación de ejes coordenados para poder obtener los coeficientes adimensionales de sustentación ( $C_l$ ) y resistencia ( $C_d$ ), (adimensionalizando con la cuerda como longitud característica y la presión dinámica para cada velocidad). A continuación se muestran los resultados obtenidos para los casos de movimiento tipo rampa únicamente.



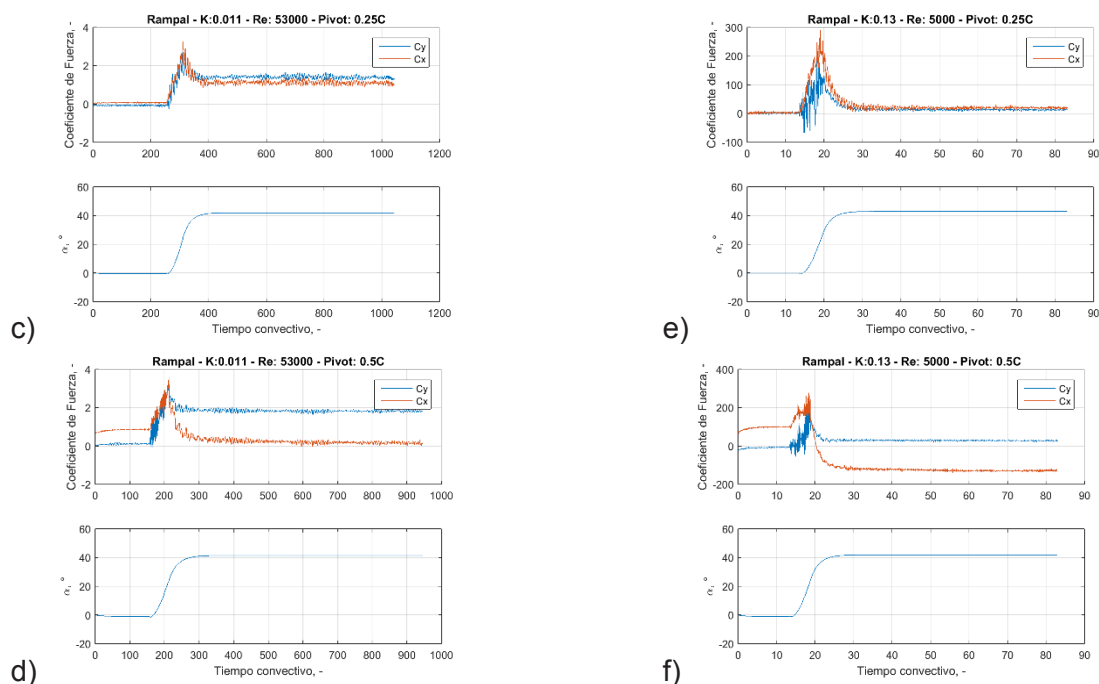


Figura 6. Coeficiente de fuerza para distintos Reynolds y frecuencias reducidas, en función del tiempo convectivo ( $t^*c/V$ ), siendo  $c$  la cuerda y  $V$  la velocidad de la corriente libre.

## CONCLUSIONES

Se realizaron mediciones de aceleración para caracterizar las vibraciones mecánicas de la estructura, así como también encontrar las frecuencias naturales del mecanismo para determinar a qué velocidades de corriente libre se produce el efecto de flutter. Se verificó teóricamente que dichas velocidades son de varios órdenes de magnitud mayor a los que se realizan los ensayos, con lo cual el efecto no se va a producir. Además, las frecuencias naturales (8~9 Hz) es un orden de magnitud mayor a las de movimiento (0,3 ~ 0,7 Hz) con lo cual los efectos de resonancia pueden ser ignorados.

Se realizaron mediciones de fuerzas para distintos casos de movimiento del ala, encontrando resultados razonables para valores de frecuencia muy bajos, pero al aumentar dicha frecuencia, la fuerza inercial toma mayor importancia con lo cual los resultados no pueden ser analizados hasta no realizar las mediciones correspondientes para poder restar dichos esfuerzos en el posprocesado. Dichos ensayos se están llevando a cabo al tiempo de confección de este trabajo, con lo cual se espera que para las próximas ediciones poder mostrar los resultados del mismo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Wei Shy, Hikaru Aono, Chang-Kwon Kang, Hao Liu. "An introduction to Flapping Wing aerodynamics" Cambridge University Press, 2013.
- [2] Ol Michael, Babinsky Holger. "Unsteady Flat Plates: a Cursory Review of AVT-202 Research. 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA Sci Tech. San Diego, California, 2016
- [3] Bernal Luis. "Unsteady Aerodynamics of Pitching Low Aspect Ratio Wings: A Review of AVT-202 panel results. 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA Sci Tech. San Diego, California, 2016
- [4] Eldredge, J. D., Wang, C. J. and Ol, M. "A Computational Study of a Canonical Pitch-Up, Pitch-Down Wing Maneuver". AIAA 2009-3687.
- [5] Watkins, S., Milbank J. and Loxton B.. "Atmospheric Winds and Their Implications for Micro air Vehicles" *AIAA Journal*. Vol. 44, No. 11, 2006
- [6] A. Mohamed, K. Massey, S. Watkins and R. Clothier, "The Attitude Control of Fixed-Wing MAVS in Turbulent Environments," *Progress in Aerospace Sciences* 66, 37-48 (2014)



## ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE LA INFLUENCIA DEL CICLO DE ACTIVIDAD EN LA INYECCIÓN PULSADA DE AIRE

Echapresto Garay, Ibán<sup>a,b</sup>, García Saíenz, Mariano<sup>a,c</sup>

<sup>a</sup>UIDET LaCLyFA, Facultad de Ingeniería, UNLP, Calle 1 y 47 (B1900TAG) La Plata, Argentina. <http://www.laclyfa.ing.unlp.edu.ar/iban.echapresto@ing.unlp.edu.ar>

<sup>b</sup>Becario de la Universidad Nacional de La Plata.

<sup>c</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

### INTRODUCCIÓN

Una cavidad expuesta a un flujo de aire produce varios fenómenos aerodinámicos dependiendo de factores como las dimensiones, la velocidad de la corriente libre, la interacción con el resto del fuselaje, etc. Pero se pueden agrupar en dos efectos para su estudio; uno es el aumento de la resistencia y el otro es el efecto aeroacústico. Este último no solo genera molestias a los pasajeros y a los alrededores de los aeropuertos, sino que también puede afectar la estructura con fenómenos de resonancia.

Los primeros trabajos sobre el estudio de cavidades se remontan a la década del 50, donde se empezaron a obtener mediciones de presión en las paredes para distintas relaciones de profundidad y largo [1], también se observó el fenómeno acústico [2]. Pero fue en el trabajo de Rossiter [3] en 1964 en donde se plantea un método para la medición de la frecuencia de los tonos producidos por el flujo de aire en cavidades abiertas.

En 1990 un trabajo de la NASA recoge mucha información para aumentar la base de datos con mediciones de presión y velocidad [4], observándose entre otras cosas que existe menos inestabilidad en cavidades profundas para bajos números de Reynolds que en cavidades poco profundas. En las últimas décadas los avances se dieron en las formas de control del flujo en cavidades. Según Cattafesta [5], se pueden clasificar las técnicas de eliminación de oscilaciones en cavidades en control pasivo y activo, luego el activo se divide entre lazo abierto y lazo cerrado, y este último puede ser estático o dinámico.

Trabajos con inyección pulsada de aire indican que se consiguen mejores resultados que cuando se utiliza inyección continua. Shaw [8, 9] sugiere que la magnitud de la disminución de los decibeles del efecto aeroacústico es función del caudal y de la frecuencia de pulsación. También muestra que se logra satisfactoriamente el control cuando se utilizan frecuencias de excitación un orden de magnitud mayor o un orden de magnitud menor a la del fenómeno.

Una de las líneas de investigación de la UIDET LaCLyFA (con trabajos [6, 7], donde se estudia el efecto de la inyección de aire en cavidades), compone la fuente de experiencia directa para la realización del presente trabajo.

En este trabajo se presentan los resultados de ensayos de inyección pulsada de aire en una cavidad cúbica de 10 cm de lado para intentar determinar experimentalmente el efecto del ciclo de actividad (de la onda cuadrada que gobierna la señal de inyección) sobre las presiones medidas en la pared opuesta al chorro de aire y el caudal inyectado.

### Ciclo de actividad

Sea una onda cuadrada de periodo  $T$  y una duración  $t$  en la que está activa, ver figura 1. Entonces se define el ciclo de actividad con la ecuación 1:

$$CA = \frac{t}{T} 100\% \quad (1)$$

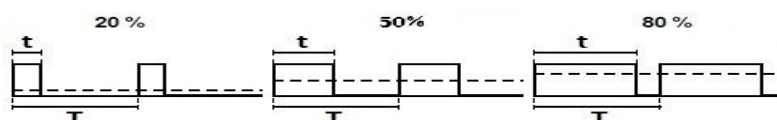


Figura 1: Ejemplos de ciclos de actividad en una onda cuadrada.



## PARTE EXPERIMENTAL

Se utilizó un modelo de cavidad de 5 paredes cuadradas de 10 centímetros de lado formando un cubo, es decir, una cavidad cúbica abierta en una cara. Dos de sus paredes son intercambiables de manera de realizar ensayos con distintos puntos de inyección de aire y distinta disposición de las tomas de presión; y una de las paredes es transparente para permitir la observación de los fenómenos fluido-dinámicos con algún método de visualización pertinente, como se aprecia en la Figura 2.

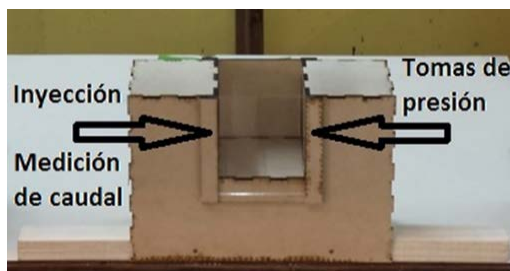


Figura 2: Modelo de cavidad.

Para el ensayo propuesto se utilizó una de las paredes intercambiables con un inyector de aire de 2 mm de diámetro interno centrado en la cara. Y en la pared intercambiable opuesta, tomas de presión de 1 mm de diámetro interno.

Se fijó la presión en 6 bares, el caudal en 4 litros por minuto. Los escáneres de presión se configuraron para adquirir a 500 Hz de frecuencia de muestreo durante 15 segundos, lo cual nos dio una cantidad de 7500 muestras y nos permitió ver fenómenos de hasta 250 Hz de frecuencia, con lo que se cubrió todo el rango de la electroválvula.

A continuación, se detallan los equipos e instrumentos utilizados en el ensayo y el esquema de conexiones en la Figura 3:

- Electroválvula Festo, MHE3-MS1H-3/2G-1/8, rango: 0 – 250 Hz.
- Caudalímetro Festo, SFAB-10U-HQ6-2SA-M12, rango: 0,1 - 10 l/min.
- Caudalímetro Festo, SFAB-600U-HQ10-2SA-M12, rango: 6 - 600 l/min.
- Dispositivo DAQ multifunción de 14 bits, 48 kS/s, National Instruments, NI-USB-6009.
- Osciloscopio Tektronix, TBS1052B.
- Escáner de presiones Scanivalve Corp., DSA 3217 16Px, de 16 tomas de presión simultáneas.
- Sensor de presión Keller, PA-21Y /25bar/ 81554.33, rango 0 – 25 bar.
- Módulo de salida analógica de  $\pm 10$  V, 100 kS/s, 4 canales, National Instruments, NI-9263.
- Chasis NI compact DAQ USB de 4 ranuras, National Instruments, NI-cDAQ-9174

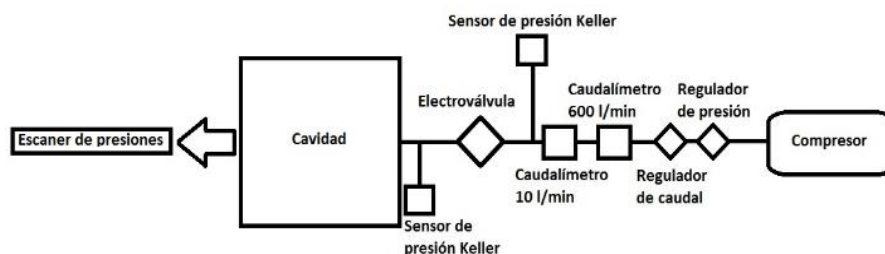


Figura 3: esquema de conexionado de equipos e instrumentos

Resultados preliminares nos permitieron establecer el rango de frecuencias de inyección entre 5 y 25 Hz, ya que, para frecuencias mayores, las presiones observadas en la cara opuesta al inyector no indican una variación correspondiente con el modo de inyección, si no que se acercan a la respuesta que se observa con inyección continua.

Se puso especial atención en la sincronización de todos los equipos e instrumentos para lograr lecturas simultáneas y así descubrir si existía desfasaje entre las señales obtenidas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis de presiones

Pudimos observar en un primer análisis que los valores pico de presión dependen del ciclo de actividad para una frecuencia fija, en la figura 4 se muestra el caso de inyección a 5 Hz con 20, 50 y 80% de ciclo de actividad.

Comparando todos los casos analizados descubrimos que se obtienen valores pico mayores siempre a menor ciclo de actividad y también que para los casos de 50 y 80 % dichos valores se mantienen suficientemente constantes indicando que el fenómeno no depende de la frecuencia cuando el ciclo de actividad es alto. Esto se debe a la compresibilidad que tiene el aire y a que, a menor frecuencia y menor ciclo de actividad, el tiempo neto que la electroválvula permanece cerrada es mayor, lográndose mayor compresión. Este resultado es alentador, ya que indica que la aplicación de un sistema de control con estas características no resultará muy costosa en el sentido de complejidad mecánica y mantenimiento debido a las bajas frecuencias que logran mayores picos de presión. En la figura 5 se observan los valores pico de presión de todos los casos ensayados.

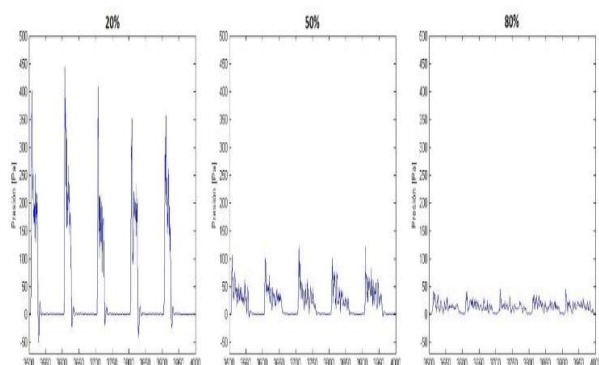


Figura 4: Presión vs. N° de muestra en la toma central.

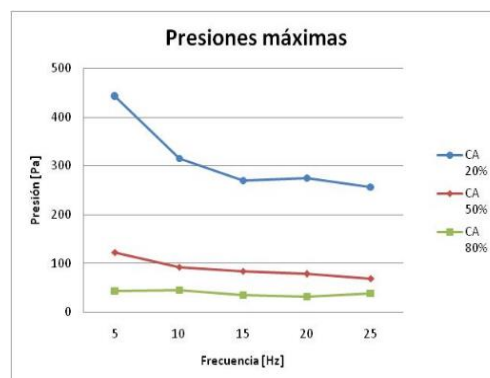


Figura 5: Valores máximos de presión.

### Análisis de caudales

Los caudales medidos en la línea de inyección tienen un comportamiento análogo a las presiones de la cara opuesta al chorro, ya que responde a la forma de la excitación de la electroválvula. La figura 6 muestra el caso de inyección a 5 Hz con 20, 50 y 80% de ciclo de actividad.

Sin embargo, existe variación para todos los ciclos de actividad y todas las frecuencias, indicando que dichas dos variables son influyentes en el resultado final del valor del caudal. Aquí también se observa la influencia de la compresibilidad del aire aumentando los caudales para los casos de menor frecuencia y menor ciclo de actividad. En la figura 7 se puede observar cómo evolucionan los valores máximos de caudal para las distintas frecuencias y ciclos de actividad.

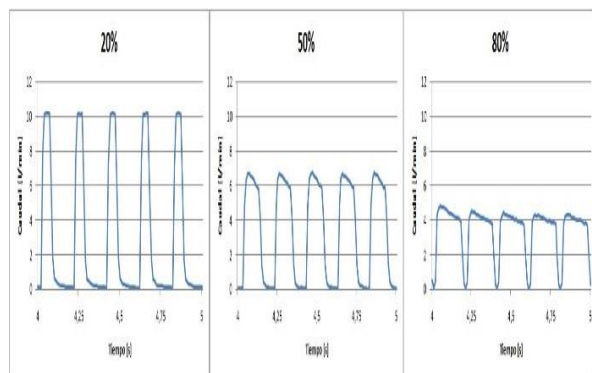


Figura 6: Caudal vs. tiempo.

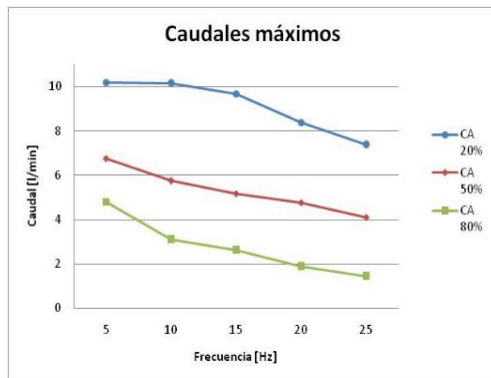


Figura 7: Valores máximos de caudal.

### Cálculo de velocidades

Utilizando los promedios de los valores de caudal medidos en la línea de inyección y conociendo el área del inyector se obtuvieron las velocidades medias de descarga para todas las condiciones de frecuencia y ciclo de actividad.

Con la teoría de chorros de aire turbulento [10] y las velocidades medias de descarga, se calcularon las velocidades a 10 cm de distancia con la ecuación 2:

$$u = 6,2 \frac{D_0}{x} u_0 \quad (2)$$

Dónde:

$u$ : velocidad en la línea central a una distancia  $x$ .

$D_0$ : diámetro inicial del chorro.

$x$ : distancia entre el inicio del chorro y donde se quiere calcular la velocidad.

$u_0$ : velocidad inicial del chorro.

Luego, teniendo en cuenta que las presiones medidas en la pared opuesta al chorro son presiones totales manométricas, se promediaron dichas presiones para calcular velocidades medias en la pared a 10 cm del inyector utilizando la ecuación 3:

$$v = \sqrt{\frac{2(P_{total} - P_{estática})}{\rho}} \quad (3)$$

Dónde:

$P_{total} - P_{estática}$ : presión medida en la pared opuesta al chorro.

$v$ : velocidad en la toma de presión.

$\rho$ : densidad del aire ( $1,22 \text{ kg/m}^3$ ).

Las velocidades medias calculadas a partir de los valores de caudal promediados se utilizaron para obtener la velocidad a 10 cm a través de la teoría de chorro ideal, luego éstas se compararon con las velocidades medias calculadas a partir de los valores de presión promediados, obteniéndose que estas últimas son aproximadamente 3 veces mayores que las obtenidas con la teoría. Esto se debe a que, por un lado, la teoría utiliza inyección de aire constante, y por el otro, se varía el ciclo de actividad con la intención de lograr mayores picos de presión.

Por el contrario, teniendo en cuenta el papel de la cavidad, el aumento puede deberse a un efecto resonador originado en la inyección pulsante; y el hecho de que exista una pared que detiene el flujo, provoca una presión de remanso que podría aumentar también los valores picos de presión.

Los valores obtenidos, junto con el error relativo, se escribieron en la tabla 1. De esta tabla se infiere que utilizar la teoría de chorro continuo para calcular parámetros del chorro pulsante conlleva un error del 70% aproximadamente. Esto se podría corregir multiplicando por un factor " $k_{pulsante}$ " que depende de la frecuencia y del ciclo de actividad. En la figura 8 se muestra una forma de obtener el factor  $k_{pulsante}$ .

Tabla 1: Error relativo entre las velocidades.

Frecuencia [Hz]	Ciclo de actividad [%]	Velocidad de descarga [m/s]	Velocidad a 10 cm [m/s] (analítica)	Velocidad a 10 cm [m/s] (experimental)	Error relativo entre las velocidades experimentales y analíticas [%]
5	20	14,94	1,85	7,98	77
	50	18,18	2,25	5,59	60
	80	17,95	2,23	4,43	50
10	20	15,81	1,96	7,09	72
	50	16,76	2,08	5,37	61
	80	12,50	1,55	4,35	64
15	20	15,51	1,92	6,59	71
	50	15,67	1,94	5,11	62
	80	10,64	1,32	4,04	67
20	20	15,42	1,91	6,44	70
	50	14,84	1,84	5,12	64
	80	7,11	0,88	4,16	79
25	20	14,41	1,79	6,27	72
	50	12,76	1,58	5,16	69
	80	5,20	0,64	4,17	85

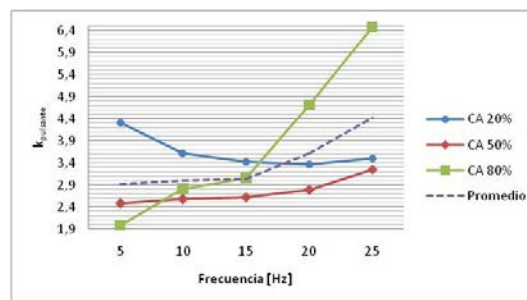


Figura 8: Gráfico para obtener el factor de corrección de velocidad para inyección pulsante.

### Cálculo del radio de dispersión

Un chorro de aire turbulento sumergido en aire en reposo adquiere la forma de un cono, donde la teoría indica que el radio de dicho cono a una distancia dada, es proporcional a dicha distancia y se puede calcular con la ecuación 4:

$$r = \frac{x}{5} + \frac{D_0}{2} \tag{4}$$

Dónde:

- r: radio de dispersión a una distancia x.
- x: distancia entre el inicio del chorro y donde se quiere calcular el radio.
- D<sub>0</sub>: diámetro inicial del chorro.

De esta manera, para una distancia de 10 cm se tiene r = 0,021 m. Pero este resultado supone un chorro continuo y libre, es decir, sin obstáculos.

Considerando que la teoría calcula el radio a partir de los límites del cono donde la velocidad es igual a cero, se graficaron curvas de nivel para observar a qué distancia del centro la presión se hacía cero.

Sabiendo que existe un obstáculo (la pared con tomas de presión) se contempla que la velocidad podría ser distinta de cero para los límites del cono (ubicándonos a una distancia r de la línea media del chorro), entonces se graficaron las curvas de nivel para los picos de presión de la toma central, asumiendo que este sería el caso más similar a la teoría de chorro libre, donde se encuentran presiones cercanas a cero a una distancia r del centro.

En la figura 9 se observan las curvas de nivel para inyección a 5 Hz con 20, 50 y 80% de ciclo de actividad. Se observa que el radio de dispersión no varía notablemente con el ciclo de actividad.

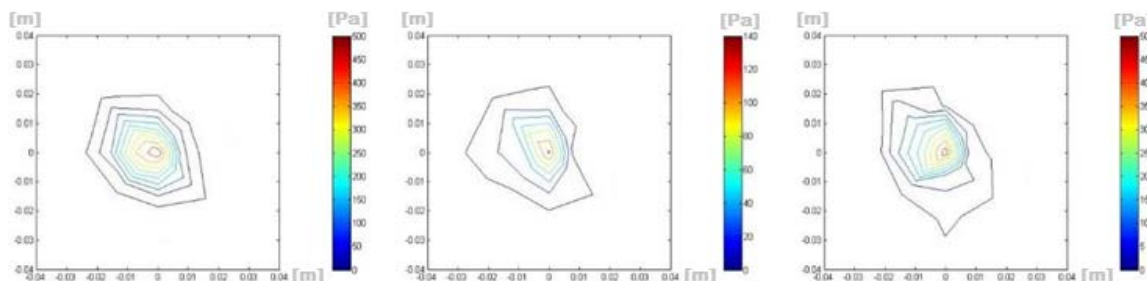


Figura 9: Curvas de nivel de presión para inyección de aire a 5 Hz.

Con el mismo tratamiento que se utilizó para las velocidades se presenta la tabla 2 con los radios estimados para todas las frecuencias y ciclos de actividad. Aquí también se obtuvo un factor de corrección, denominado “k<sub>radio</sub>”, para calcular el radio de dispersión de un chorro pulsante a partir de la teoría de chorro continuo, ver figura 10.

Tabla 2: Radios de dispersión estimados.

Frecuencia [Hz]	Ciclo de actividad [%]	Radio de dispersión del chorro continuo y libre a 10 cm [m]	Radio de dispersión del chorro pulsante y obstaculizado [m]	Error relativo entre los radios [%]
5	20	0,021	0,018	17
	50	0,021	0,018	17
	80	0,021	0,018	17
10	20	0,021	0,016	31
	50	0,021	0,016	31
	80	0,021	0,016	31
15	20	0,021	0,014	50
	50	0,021	0,014	50
	80	0,021	0,014	50
20	20	0,021	0,013	62
	50	0,021	0,013	62
	80	0,021	0,013	62
25	20	0,021	0,012	75
	50	0,021	0,012	75
	80	0,021	0,012	75

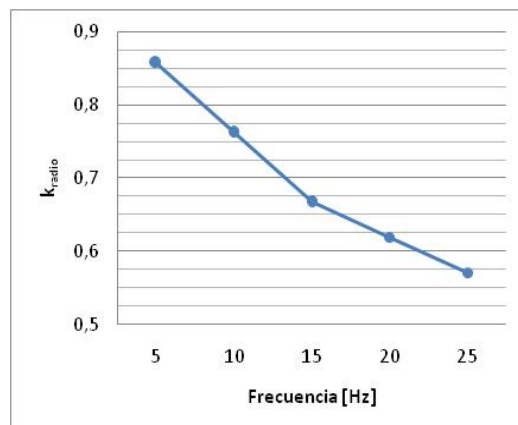


Figura 10: Gráfico para obtener el factor de corrección del radio de dispersión para inyección pulsante.

## CONCLUSIONES

Con respecto a las presiones, se puede concluir que el ciclo de actividad afecta los valores pico que se observaron en la pared opuesta a la descarga, ya que, a menor frecuencia y ciclo de actividad, estos fueron mayores. Una posible explicación de este fenómeno es atribuirlo a la compresibilidad del aire, un menor ciclo de actividad mantiene la electroválvula cerrada por más tiempo y esto posibilita una mayor compresión.

Los caudales instantáneos medidos tienen una respuesta similar a las presiones, estos aumentaron en los casos de menor frecuencia y menor ciclo de actividad. Este resultado junto con el de las presiones, indica el potencial de la variación del ciclo de actividad en la utilización de sistemas de control activo con inyección de aire, ya que se obtienen mejores resultados y son menos costosos que aquellos de frecuencias mayores.

Del análisis espectral se puede concluir que la respuesta en frecuencia utilizada en los instrumentos fue adecuada para detectar el fenómeno en estudio, ya que los mismos respondieron satisfactoriamente. Los ensayos auxiliares permitieron asegurar el sincronismo entre las señales de entrada (control de electroválvulas) y las de salida (sensores).

Para las velocidades se observaron discrepancias entre los resultados del ensayo y los valores analíticos, pero se atribuyen a la naturaleza de la inyección, ya que ésta es pulsante y la teoría utiliza inyección continua. De esta manera se puede asumir que las velocidades calculadas a partir de inyección pulsante son aproximadamente 3 veces mayores que las velocidades obtenidas a partir de inyección continua de aire.

Por último, cuando se trata del radio de dispersión sucede algo similar a lo ocurrido con las velocidades ya que también se utilizó la teoría de chorro de aire turbulento, para ambos casos se obtuvo un factor de corrección para poder utilizar las ecuaciones planteadas para chorro continuo en el caso de que se utilice chorro pulsante.

## REFERENCIAS

- [1] Roshko, A., 1955. "Some measurements of flow in a rectangular cutout". NACA technical note 3488.
- [2] Krishnamurty, K., 1955. "Acoustic radiation from two-dimensional rectangular cutouts in aerodynamic surfaces". NACA technical note 3487.
- [3] Rossiter, J. E., 1964. "Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds". Aeronautical Research Council Reports and Memoranda, No. 3438.
- [4] Plentovich, E. B., 1990. "Three-dimensional cavity flow fields at subsonic and transonic speeds". NASA technical memorandum 4209.
- [5] Cattafesta, L. N., III, Williams, D. R., Rowley, C. W., Alvi, F. S., 2003. "Review of active control of flow-induced cavity resonance". AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit.

- [6] García Saínz, M., Marañón Di Leo, J., Delnero, J. S., 2013. "Caracterización de la inyección pulsante de aire para control de flujo". Terceras Jornadas de Investigación y Transferencia, Facultad de Ingeniería, UNLP.
- [7] García Saínz, M. O., Marañón Di Leo, J., Delnero, J. S., Colman, J., Algozino, S., 2013. "Control de flujo activo sobre una cavidad a bajo número de Reynolds". Segundas Jornadas de Investigación y Transferencia, Facultad de Ingeniería, UNLP.
- [8] Shaw, L., 1998. "Active control for cavity acoustics". AIAA 98-2347.
- [9] Shaw, L., Northcraft, S., 1999. "Closed loop active control for cavity acoustics". AIAA 99-1902.
- [10] Abramovich, G. N., 1963. "General properties of turbulent jets" MIT press.



## PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS FRECUENCIAS Y MODOS ACÚSTICOS DE UN TUBO

Pablo Mantelli<sup>a</sup> y Guillermo Capittini<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>UIDET-LaCLyFA, Dpto. Aeronáutica, Fac. Ing., U.N.L.P – Calle 116 e/ 47 y 48 – CP: 1900 – La Plata, Buenos Aires, Argentina.

<sup>b</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas  
[pablo\\_mante@yahoo.com.ar](mailto:pablo_mante@yahoo.com.ar)

### INTRODUCCIÓN

En varios campos de la ingeniería, resulta necesario realizar ensayos que caractericen o nos muestren el estado de un sistema ante perturbaciones originadas por ruido. Sistemas como aerogeneradores, provocan ruidos molestos de origen aerodinámico. Las ranuras que se generan en puertas y ventanas de aeronaves y hasta vehículos terrestres generan ruidos molestos. Desde el punto de vista del control de flujo, caracterizar y controlar ondas de presión mediante técnicas acústicas es un tema actual de análisis y estudio.

Caracterizar un sistema acústico significa determinar las respuestas que generan las ondas de presiones en un sistema dado ante diferentes perturbaciones. En este trabajo se plantea la caracterización experimental de la dinámica acústica de un tubo para comparar luego con las respuestas dinámicas obtenidas de manera teórica.

Los modos acústicos en un tubo se pueden clasificar en longitudinales, radiales y tangenciales. Además pueden hacerse presente combinaciones de los distintos modos.

En la figura 1 se muestra una representación de la distribución del campo de presiones para los diferentes tipos de modos acústicos.

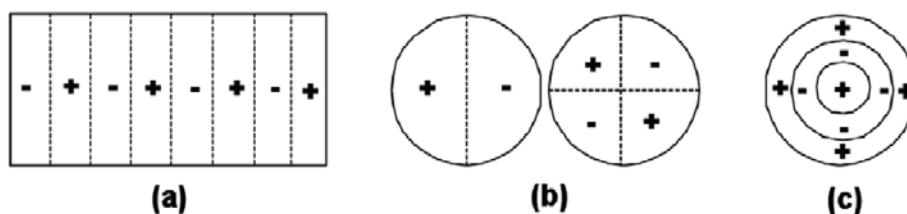


Figura 1: (a) Longitudinal. (b) Tangencial. (c) Radial

Estos modos están asociados a inestabilidades a altas frecuencias como suele ocurrir en cámaras de combustión de motores cohetes debido al acoplamiento del proceso de combustión y la acústica de la cámara. Este fenómeno impacta de manera nociva sobre la estructura del sistema dado que produce un incremento en los niveles vibratorios. Por lo dicho es deseable detectar los modos acústicos de la cámara para poder estimar en que niveles de frecuencia ocurrirán las inestabilidades. La estimación de estas frecuencias puede llevarse a cabo en forma experimental y, además, en forma teórica lo que permite verificar resultados a la hora de elaborar conclusiones. Tener conocimiento de cuándo ocurrirán las inestabilidades permitiría emplear medidas para evitar o reducir al mínimo las mismas. Cambiando algunos parámetros en la cámara de combustión, se puede obtener un diseño menos susceptible a este tipo de inestabilidades. Además, dispositivos pasivos para la atenuación del ruido acústico, como resonadores de Helmholtz, revestimientos y filtros de ondas pueden ser introducidos en la cámara de combustión.

### DISEÑO EXPERIMENTAL

Los ensayos se realizan sobre un modelo el cual consistía en un tubo cerrado en ambos extremos con un radio de 11cm y un largo de 26cm. Este se encuentra apoyado sobre

soportes de madera que le proporcionan una elevación de 5cm. En la cara frontal del modelo se encuentra un orificio por el cual se introduce el micrófono de alta sensibilidad (782121-02 GRAS 1/2" Free-Field Response Microphone).

A una distancia de 1 cm de la cara posterior se instala una fuente de excitación sonora por el cual se emitirá, por medio de un generador de señales (NI - USB CDAQ-9174) y un acondicionamiento de la misma a través de una potencia, un ruido blanco con frecuencia de corte en 10 KHz.

El soporte del micrófono de alta sensibilidad está conformado por un arreglo de tubos que permiten el movimiento a lo largo del modelo con el fin de obtener mediciones en distintos puntos. El esquema general del arreglo experimental puede verse en la figura 2.

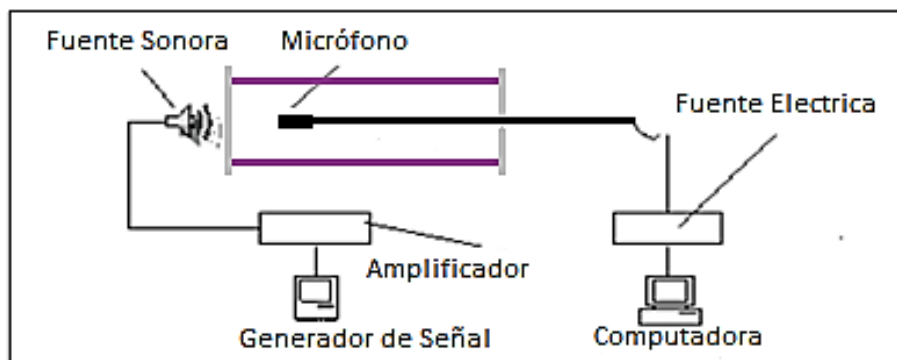


Figura 2: Esquema general del arreglo experimental

Tanto la generación y adquisición de las señales se realiza por el software Labview.

## METODOLOGÍA

Para obtener las frecuencias acústicas del tubo se monta el sistema según describe el diseño experimental. Mediante la fuente de excitación sonora se perturba el tubo con un ruido blanco cuya frecuencia de corte es 10 kHz (Figura 3), se posiciona un micrófono en el interior del tubo y se obtiene la señal sonora por un tiempo de 3 segundos (Figura 4). Luego se obtiene la señal sonora en el mismo punto sin la presencia del tubo (Figura 5), a partir de la división de la PSD de la señal en presencia del tubo y sin ella, se obtiene la función de transferencia del sistema, en la cual pueden observarse las frecuencias naturales en los picos de la misma.

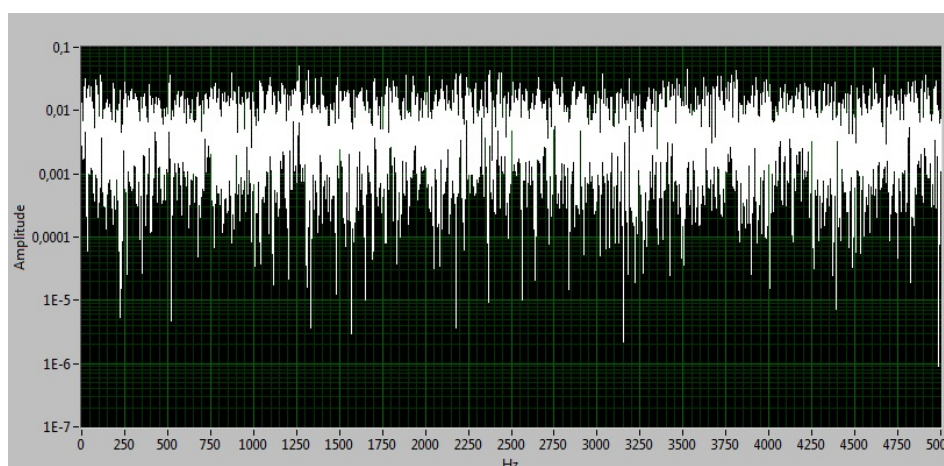


Figura 3: PSD del ruido blanco generado

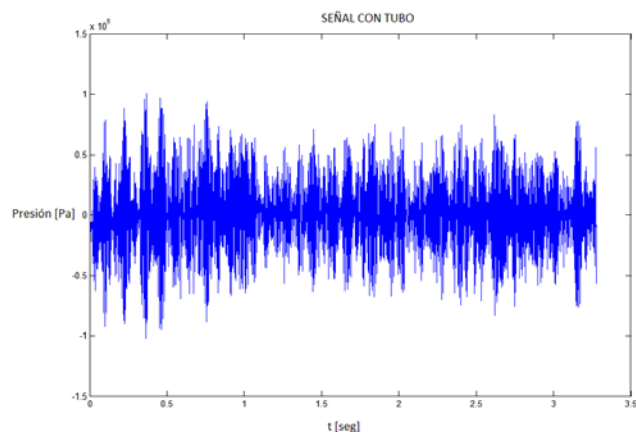


Figura 4: Medición con tubo

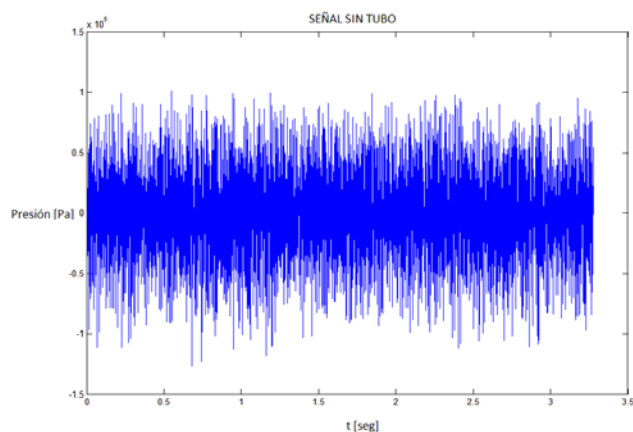


Figura 5: Medición sin tubo

Se procede luego a comparar los resultados experimentales con el cálculo teórico [1] de las frecuencias naturales.

Al ser utilizado en el ensayo un micrófono de campo lejano el mismo debe posicionarse en la dirección de propagación de la onda, por lo tanto la metodología descrita anteriormente se repite para el micrófono en dirección del eje longitudinal del cilindro (Ensayo Longitudinal) y en dirección radial (Ensayo Radial).

## RESULTADOS

Se presentan a continuación las funciones PSD obtenidas para la señal sin presencia (Figura 6) y en presencia del tubo (Figura 7), como también así el cociente entre ellas (Figura 8), para el ensayo longitudinal.

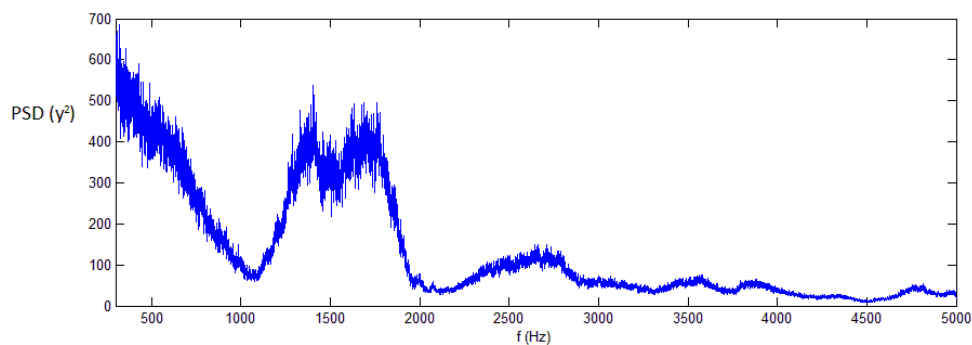


Figura 6: PSD sin el tubo (longitudinal)

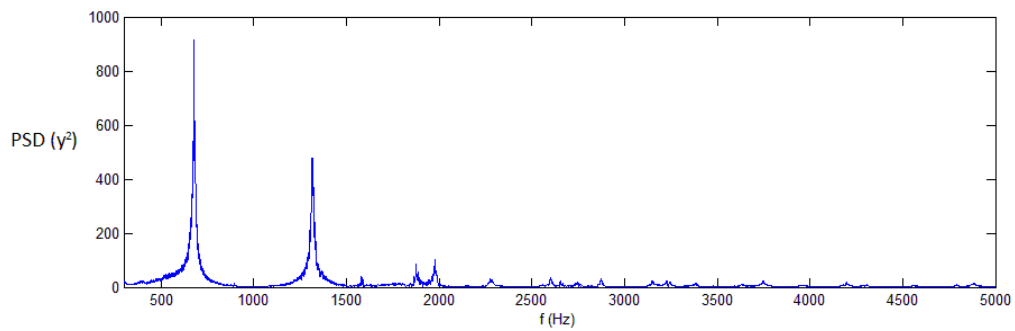


Figura 7: PSD con el tubo (longitudinal)

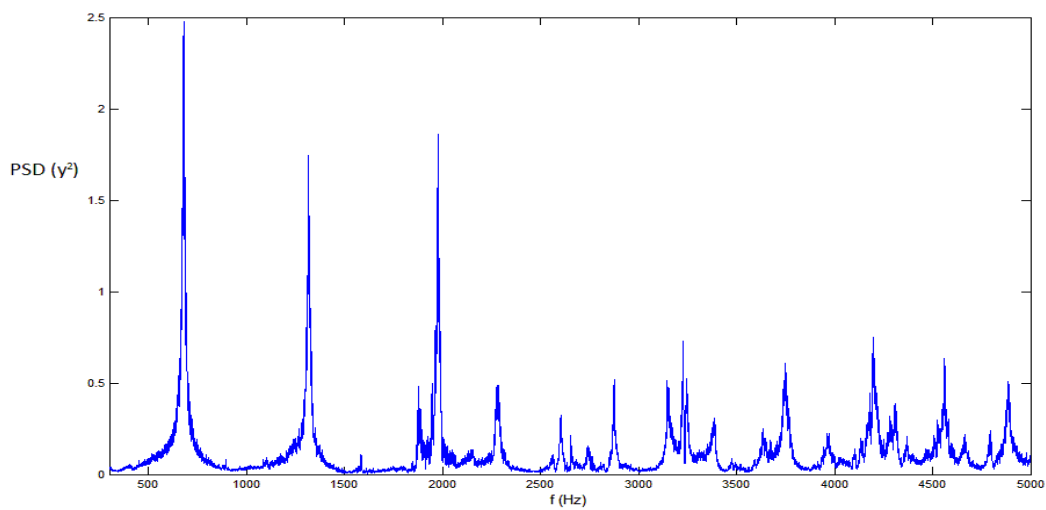


Figura 8: PSD del tubo (longitudinal)

Se presentan a continuación las funciones PSD obtenidas para la señal sin presencia (Figura 9) y en presencia del tubo (Figura 10), como también así el cociente entre ellas (Figura 11), para el ensayo radial.

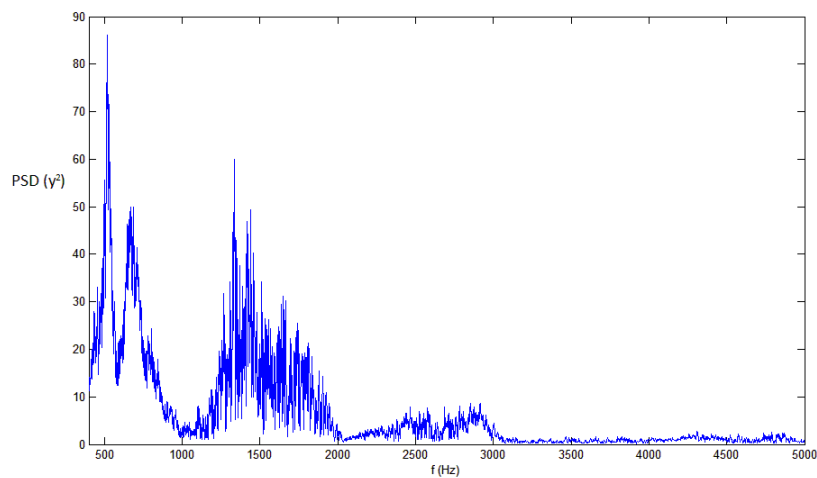


Figura 9: PSD sin el tubo (radial)

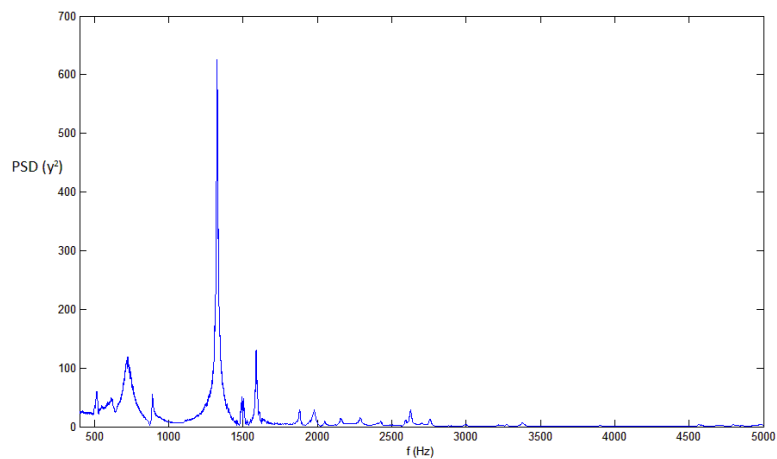


Figura 10: PSD con el tubo (radial)

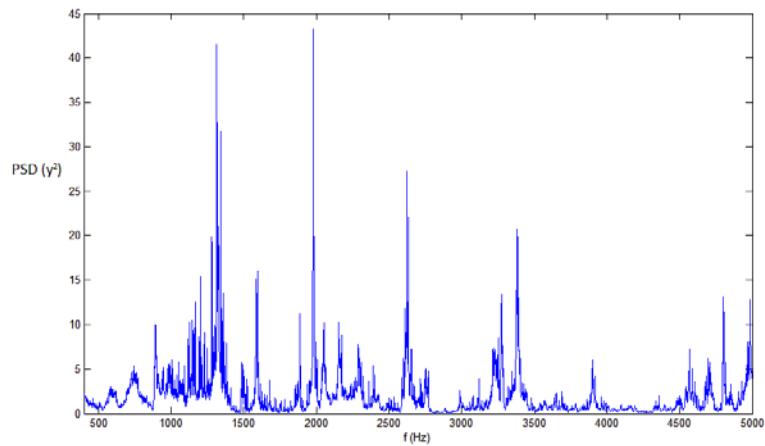


Figura 11: PSD del tubo (radial)

Se muestran en las figuras 12 y 13 la función de transferencia del tubo, junto con las frecuencias calculadas de forma teórica para el ensayo longitudinal y el radial respectivamente.

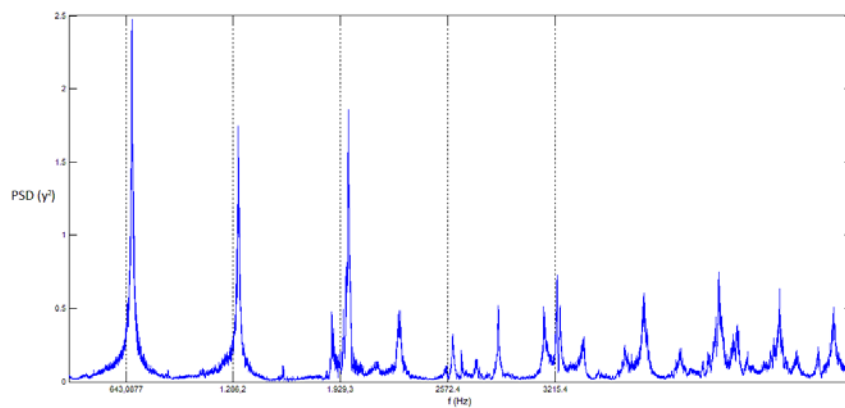


Figura 12: Frecuencias experimentales vs teóricas, medición longitudinal

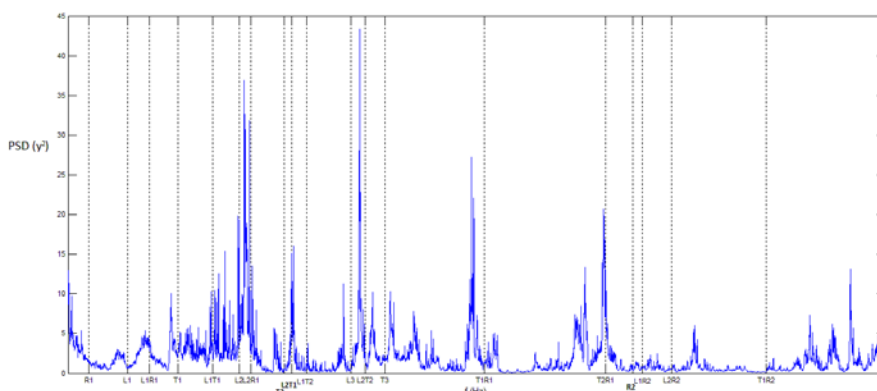


Figura 13: Frecuencias experimentales vs teóricas, medición radial

	Modos longitudinales		Modos teóricos transversales y radiales	
	Teórico [Hz]	Experimental [Hz]		
			tang1	930 Hz
1er modo	643	679	tang2	1540 Hz
2do modo	1286	1315	tang3	2120 Hz
3er modo	1929	1978	Rad1	420 Hz
			Rad2	3550 Hz
			Rad3	5140 Hz

Tabla 1: Valores teóricos (no incluye modos acoplados)

## DISCUSION

Se puede observar en la figura 12 que para modos longitudinales los datos experimentales se condicen con los cálculos teóricos.

En el ensayo radial observamos en la figura 13 que existen gran cantidad de picos en la función de transferencia del tubo, muchos se encuentran en frecuencias cercanas a las calculadas de forma teórica, aunque existen gran cantidad de picos que no pueden ser asociados a los fenómenos acústicos. Parte de los picos encontrados pueden ser resultado de los modos estructurales del tubo, puede ocurrir que durante el ensayose exciten sus frecuencias naturales estructurales y que las vibraciones de las paredes generen cambios de presión en el interior del tubo, siendo estos captados por el micrófono.

## CONCLUSIONES

La metodología resulta muy adecuada para el cálculo de las frecuencias longitudinales, mientras que para la determinación de las frecuencia naturales de los modos laterales y los acoplamientos de los mismos, sería necesario contar con la distribución del campo de presiones para cada modo en particular para posicionar de forma óptima el micrófono con el fin de lograr una mejor identificación de ese modo. A demás es necesario contar con la información sobre las frecuencias naturales estructurales con el objetivo de poder filtrar las mismas de las grafica de función PSD, dejando a si solo en evidencia los modos acústicos

## REFERENCIAS

- [1] M. Dranovsky - *Combustion instabilities liquid rocket engines, testing and development practices in Russia – 2007*
- [2] Laudien, E., Pongratz, R., Piero, R., Preclik, D., 1995, "Experimental Procedures Aiding the Design of Acoustic Cavities", in: V. Yang, W. E. Anderson (Eds.).
- [3] Rogério Pirk, Carlos d'Andrade Souto, Dimas Donizeti da Silveira - "Liquid rocket combustion chamber acoustic characterization".
- [4] Philip M. Morse – *Vibration and sound*.



## RELACIÓN ENTRE LAS SUPERFICIES LIMITADORAS DE OBSTÁCULOS Y EL COEFICIENTE DE UTILIZACIÓN DE PISTAS EN AEROPUERTOS DEL SISTEMA NACIONAL DE AEROPUERTOS

Sergio Pitrelli, Alejandro Di Bernardi, Matías Chapela, Federico Pinto.

Grupo de Transporte Aéreo – UIDET GTA-GIAI. Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: [sergio.pitrelli@ing.unlp.edu.ar](mailto:sergio.pitrelli@ing.unlp.edu.ar) , [gta@ing.unlp.edu.ar](mailto:gta@ing.unlp.edu.ar)

**Palabras claves:** Aeropuerto, pistas, orientación, superficies, obstáculos, vientos.

### Resumen

En la planificación y diseño de un aeropuerto, una de las infraestructuras de mayor importancia resulta ser la pista, y dentro de las cuestiones a contemplar para garantizar la operación segura, eficiente y regular de una aeronave es la dada por la orientación de la pista en función de los vientos reinantes y por obstáculos existentes en entorno inmediato.

En este contexto, el presente trabajo tiene por objeto comentar la relación existente entre los obstáculos de una pista y los vientos predominantes. Para ello, se realiza un análisis de los posibles obstáculos por medio de las superficies limitadoras de obstáculos (SLOs) y de los vientos reinantes por medio del coeficiente de utilización de pista, dado por la rosa de los vientos.

Básicamente se trata de dar a conocer la relación de operatividad de una pista y, por ende, de un aeropuerto o aeródromo, con aquellas cuestiones naturales que pueden afectar la seguridad operacional, para ello, se evalúan las pistas combinadas con el tipo de operación y se presentan indicadores de la relación entre orientación de pista por superficies limitadoras de obstáculos y vientos reinantes en el predio aeroportuario. Por otra parte, se genera discusión sobre la situación ideal desde el punto de vista de la planificación y la situación real respecto de los aspectos mencionados.

El análisis está realizado para pistas de aeropuertos del sistema nacional de aeropuertos argentino (SNA) y sobre la base de la experiencia de los trabajos desarrollados en Planes Maestros Aeroportuarios en la UIDET GTA-GIAI y de la normativa de aplicación dada por la Organización de Aviación Civil Internacional.

### INTRODUCCIÓN

Para la planificación y diseño de un aeropuerto, una de las infraestructuras a tener en cuenta de mayor relevancia es la representada por la pista, si bien la misma es un elemento físico único, tiene dos funciones esencialmente muy diferentes, son las de servir para los aterrizajes y los despegues de aeronaves con diferentes performances, si a lo anteriormente dicho, le agregamos que puede ser utilizada en dos sentidos, tenemos una única pista física que representa 4 pistas operativas.

Una pista por ser un elemento donde a largo de su eje y de sus extensiones se realizan las operaciones de aeronaves, su emplazamiento y orientación son de suma importancia, es por ello que dentro de los puntos a estudiar al planificar y/o diseñar un aeropuerto el análisis de los obstáculos del entorno y el de vientos reinantes cobra especial relevancia.

El análisis de obstáculos se puede realizar por medio de las superficies limitadas de obstáculos (SLOs), las mismas, son superficies imaginarias complejas en torno a la pista cuya función es limitar la proyección en altura de elementos que puedan poner en riesgo la seguridad de una aeronave, las mismas están definidas por normativa según el tipo y características de la

operación que se realizan y, según el caso, pueden llegar hasta 15 km más allá de los umbrales.

El análisis de vientos reinantes de una pista se realiza mediante un estudio donde, básicamente, se reflejan las características de los vientos del emplazamiento (intensidad, frecuencia y dirección) mediante un diagrama llamado “rosa de los vientos” y del cual se obtiene el porcentaje del tiempo que una pista no está limitada por componentes transversales de viento, el mismo está representado por el coeficiente de utilización de pista.

En un trabajo anterior al presente [1] se ha realizado un análisis teórico de SLOs de los aeropuertos del Sistema Nacional de Aeropuertos (SNA), en el mismo se han observado aeropuertos cuyas superficies están vulneradas por terreno natural, en función de ello, se ha realizado una prelación de aeropuertos a tener en cuenta para realizar estudios especiales con el fin de mitigar o minimiza el riesgo para la seguridad operacional.

Teniendo en cuenta el trabajo anterior, en el presente se ha incorporado un análisis de vientos reinantes de los aeropuertos del SNA y se han obtenido nuevos indicadores de prelación de aeropuertos, logrando así combinar en un resultado más amplio ambas temáticas.

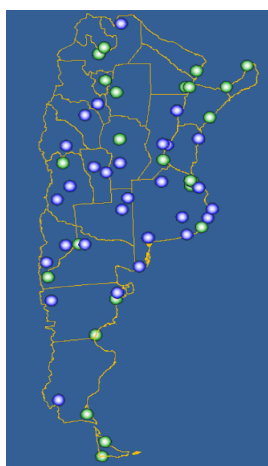


Fig. 1 Aeropuertos de análisis

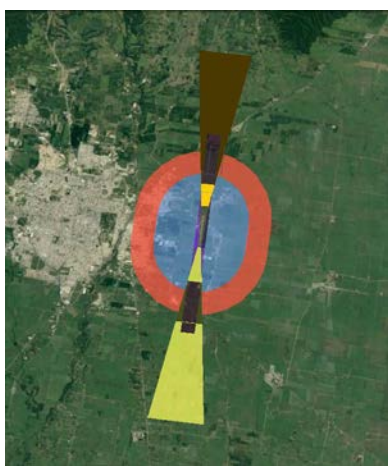


Fig. 2 Superficies limitadoras tipo

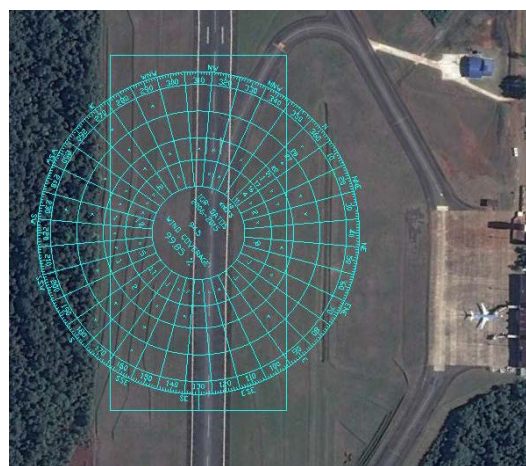


Fig. 3 Rosa de vientos tipo

## Metodología

Para el desarrollo del trabajo se han adoptado las siguientes hipótesis de desarrollo:

- Los aeropuertos considerados son los del SNA que presentan vulneración de obstáculos según el trabajo precedente [1].
- Las vulneraciones consideradas de SLOs son las generadas solo por el terreno natural.
- Las prelación obtenidas en el trabajo precedente [1] son validas
- Para los aeropuertos que no cuentan con datos de vientos se han adoptado los datos de la estación más cercana al mismo.

Las fuentes de información utilizadas han sido

- Aeronautical Information Publication (AIP) de Argentina
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN)
- <https://airports-gis.faa.gov/airportgis/publicToolbox/windroseForm.jsp>

El desarrollo de la metodología, básicamente, está fundamentado en tres partes, en primera instancia se consideran los análisis de SLOs, en segundo término, los análisis de vientos y por

último se combinan estos análisis precedentes de forma de obtener nuevas prelacones, lo antedicho se ve reflejado en el siguiente diagrama

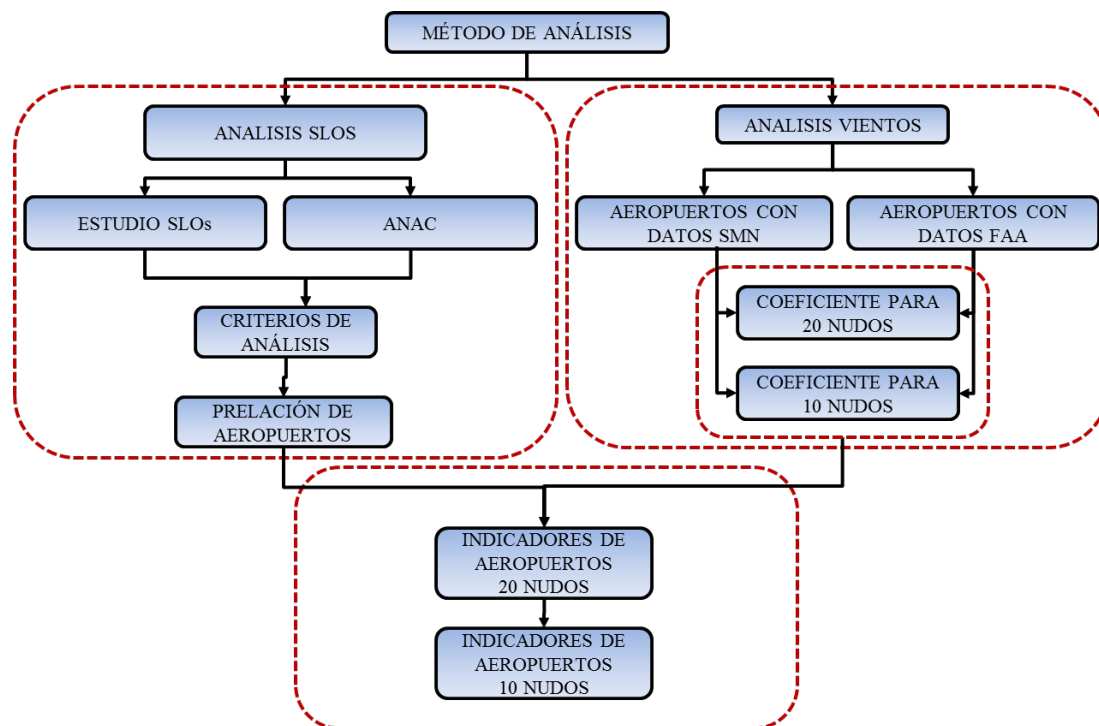


Fig. 4. Proceso de análisis.

### Desarrollo

Primera parte: Del trabajo realizado precedentemente [1] se han observado aeropuertos del SNA que presentan vulneración de obstáculos.

Según las variables que se presentan a continuación se han realizado dos ponderaciones para obtener una prelacon de aeropuertos por SLOs.

Grupo	Característica	Valores según criterios	Índice de Relevancia
G <sub>1</sub> Operación	Tipo de aeropuerto (Ta)	Internacional = 1,0	$R1 = (Ta + To)xf1$ (1) f1: factor de escala (1500)
		Cabotaje = 0,5	
	Tipo de operación (To)	Aprox. instrumental de precisión= 1,0	
		Aprox. instrumental no precisión = 0,5	
G <sub>2</sub> Vulneración SLOs	Sup. aproximación (Sa)	2,0	$R2 = (Sa + Sd + Sh + Sc + St + Pa)xf2$ (2) f2: factor de escala (1500)
	Sup. despegue (Sd)	2,0	
	Sup. horizontal interna (Sh)	1,0	
	Sup. cónica (Sc)	1,0	
	Sup. transición (St)	1,5	
	Población afectada (Pa)	P. urbana = 1,0 P. rural = 0,5	
G <sub>3</sub> Tráfico	Mov. de aeronaves (Ma)	Valor según estadística ORSNA 2015	Ma

Tabla 1: Variables de análisis.

La primera ponderación  $P_1 = (R_1 \times R_2) / 1500$  conjuga las vulneraciones de SLOs propiamente dichas con la operación de la pista ( $G_1$  y  $G_2$ ).

La segunda ponderación  $P_2 = P_1 \times M_a \times 0.20$  combina los dos aspectos anteriores más el tráfico ( $G_1$ ,  $G_2$  y  $G_3$ ).

De lo anterior se han obtenido las siguientes prelacones.

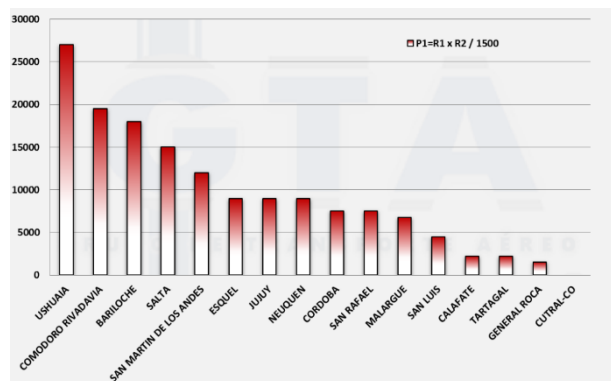


Fig. 5 Prelación P1 (según G1 y G2)

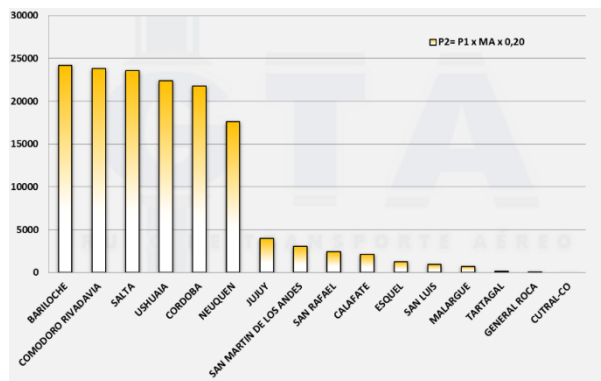


Fig. 6 Prelación P2 (según G1, G2 y G3)

Segunda Parte: Se han realizado los análisis de vientos predominantes de los 53 aeropuertos, prestando especial atención a cada uno de los aeropuertos que presentan vulneración de obstáculos (16 aeropuertos).

Se ha calculado el coeficiente de utilización de pista por medio de la rosa de los vientos y teniendo en cuenta componentes de vientos cruzados en pista de 20 nudos (37km/h) y 10 nudos (19 km/h). Esto considera aeronaves cuya longitud de campo de referencia (LCR) es superior a 1500 m y aeronaves cuya LCR es inferior a 1200m respectivamente.

La LCR de aeronaves mayores a 1500 m considera aeronaves de gran porte y la LCR menores de 1200 m contempla aeronaves de pequeño porte.

Vale mencionar que, la normativa recomienda no tener datos menores a 8 registros diarios y durante al menos un periodo de 5 años (14.400 registros), en este caso los datos de vientos varían entre los 30.000 a los 90.000 registros según el aeropuerto.

De lo anterior se han obtenido los siguientes coeficientes.

AEROPUERTO	Coefficiente utilización de pista (para 20 nudos - 37 Km/h)	Coefficiente de utilización de pista (para 10 nudos - 19 km/h)
COMODORO RIVADAVIA	98,18%	81,36%
BARILOCHE	99,95%	93,39%
USHUAIA	99,18%	86,77%
SALTA	99,95%	99,40%
CORDOBA	99,99%	99,09%
NEUQUEN	99,91%	96,62%
SAN MARTIN DE LOS ANDES	92,72%	56,38%
JUJUY	99,97%	97,19%
SAN RAFAEL	99,91%	96,51%
CALAFATE	98,60%	83,38%
ESQUEL	98,86%	82,04%

AEROPUERTO	Coefficiente utilización de pista (para 20 nudos - 37 Km/h)	Coefficiente de utilización de pista (para 10 nudos - 19 km/h)
SAN LUIS	97,61%	80,97%
MALARGÜE	99,64%	92,27%
TARTAGAL	99,99%	99,22%
GENERAL ROCA	99,91%	96,62%
CUTRAL-CO	99,91%	98,94%

Tabla 2: Coeficientes de utilización de pista.

Tercera parte: En esta fase, se ha conceptualizado un nuevo indicador que marca la influencia que podría tener el viento sobre las prelaciónes  $P_1$  y  $P_2$ , para ello ha definido al indicador como el cociente de la Prelación por el coeficiente de utilización de pista por un factor de escala para que los resultados sean comparables, con ello surgen las siguientes valoraciones:

Indicador	Concepto	Variables
$I_{1-20} = \frac{P_1}{C_{20}} \times F_e$	Indica como varia la $P_1$ según el coeficiente de utilización de pista con componente de viento cruzado de 20 nudos	$P_1$ : Ponderación según vulneración y tipo de operación
$I_{1-10} = \frac{P_1}{C_{10}} \times F_e$	Indica como varia la $P_1$ según el coeficiente de utilización de pista con componente de viento cruzado de 10 nudos	$C_{20}$ : Coeficiente de utilización de pista para 20 nudos de viento cruzado $F_e$ : Factor de escala (1,1)
$I_{2-20} = \frac{P_2}{C_{20}} \times F_e$	Indica como varia la $P_2$ según el coeficiente de utilización de pista con componente de viento cruzado de 20 nudos	$C_{10}$ : Coeficiente de utilización de pista para 10 nudos de viento cruzado
$I_{2-10} = \frac{P_2}{C_{10}} \times F_e$	Indica como varia la $P_2$ según el coeficiente de utilización de pista con componente de viento cruzado de 10 nudos	$P_2$ : Ponderación según vulneración, tipo de operación y trafico

Tabla 3: Indicadores de análisis.

## RESULTADOS

En función de lo anterior, los resultados que se han obtenido son los siguientes:

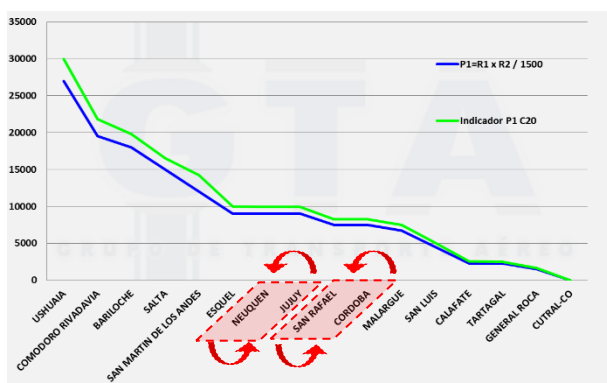


Fig. 7 Indicador  $I_{1-20}$

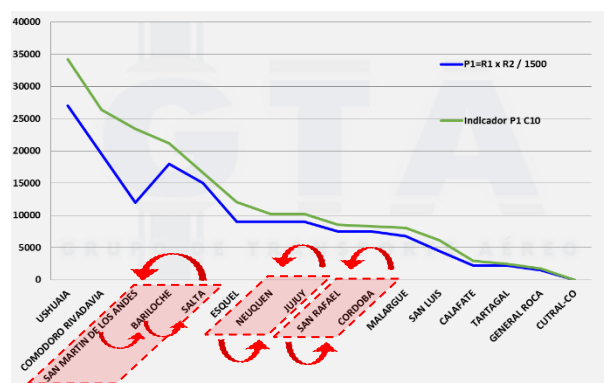


Fig. 8 Indicador  $I_{1-10}$



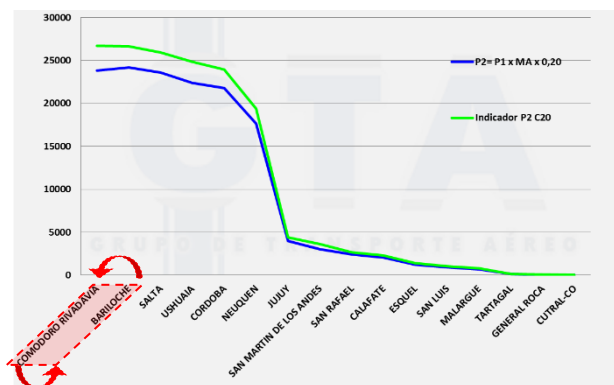


Fig. 9 Indicador  $I_{2-20}$

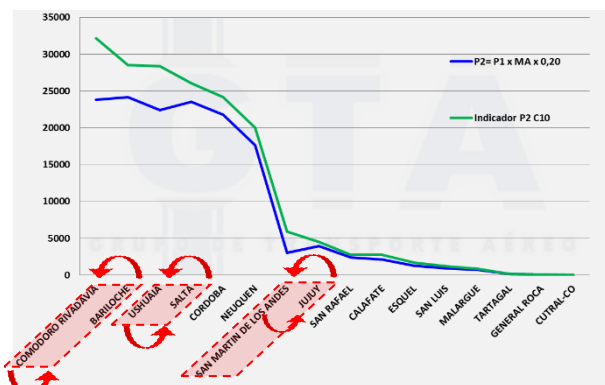


Fig. 10 Indicador  $I_{2-10}$

## DISCUSIÓN

Desde el punto de vista de la seguridad operacional, sería deseable que las superficies limitadoras estuviesen libres de obstáculos, no obstante, del análisis teórico de SLOs sobre 53 aeropuertos, se han observado que en 15 de ellos (28%) se presentan vulneraciones, es por esto que, resulta de interés analizar otros factores que combinados con estas situaciones puedan degradar estas condiciones. En este caso se ha analizado, como, podría influir en estas situaciones el viento.

La normativa de aplicación para planificación y diseño recomienda que, el coeficiente de utilización de pista no sea inferior al 95% para las aeronaves que está destinada a servir, es decir que la operatividad de una pista no se vea afectada o limitada por componentes de vientos cruzados más del 5% del tiempo que esté prevista su operación.

Los coeficientes de la tabla 2, muestran que esto no se cumple para, un caso con componentes de vientos cruzados de 20 nudos (San Martín de los Andes) y para 8 casos con componentes de vientos cruzados de 10 nudos (Comodoro Rivadavia, Bariloche, Ushuaia, San Martín de los Andes, Calafate, Esquel, San Luis y Malargüe) ello tiene como consecuencia que en estos aeropuertos las aeronaves de mayor porte se vean menos afectadas que las aeronaves de menor porte por componentes de viento cruzado en una relación de 1 a 8.

La prelación  $P_1$ , cuando se la combina con viento cruzado de 20 nudos presenta dos alteraciones en su ordenamiento, que son dos intercambios, Neuquén se alterna con Jujuy y por otra parte Córdoba se alterna con San Rafael, esto se ve relegado en el indicador  $I_{1-20}$

Así mismo, la ponderación  $P_1$  cuando se la combina con viento cruzado de 10 nudos presenta tres alteraciones en su ordenamiento que son, en primer y segundo término las mismas que para viento cruzado de 20 nudos y, en tercer término, San Martín de los Andes pasa de la quinta a la tercera posición desplazando a Bariloche y Salta, esto se observa en el indicador  $I_{1-10}$

De la misma forma, la prelación  $P_2$  cuando se combina con viento cruzado de 20 nudos presenta una sola alteración, que es una alternancia entre Comodoro Rivadavia y Bariloche, como lo refleja el indicador  $I_{2-20}$

Por último, la prelación  $P_2$  cuando es combinada con viento cruzado de 10 nudos presenta tres alternancias que son, la primera igual a la que presenta para 20 nudos, la segunda alterna Ushuaia con Salta y la tercera alterna San Martín de los Andes con Jujuy, como se observa en el indicador  $I_{2-10}$

## CONCLUSIÓN

Del análisis anterior surge que en las prelações de los aeropuertos donde hay vulneración de obstáculos por el terreno natural el viento presenta una incidencia relativamente baja sobre las



mismas ya que si bien genera alteraciones locales estas no son significativas en el orden general.

Gran parte de la explicación de lo anterior es debido a que los coeficientes de orientación de pista son en general valores buenos, o, dicho de otro modo, la orientación de pista respecto de los vientos predominantes en general es buena.

Para el análisis donde se tiene en cuenta la vulneración de obstáculo combinado con el tipo de operación ( $P_1$ ), lo dicho anteriormente se observa comparando el orden de los aeropuertos de la figura 5 con las figuras 7 y 8.

Para el análisis donde se tiene en cuenta la vulneración de obstáculos combinada con el tipo de operación y con el tráfico ( $P_2$ ), lo anteriormente dicho se observa comparando el orden de los aeropuertos de la fig. 6 con las figuras 9 y 10.

Por otra parte, destacar la importancia del tema en relación a la seguridad operacional y a poder cuantificar los diferentes factores a tener en cuenta tanto aisladamente como de forma combinada para obtener un resultado conjunto.

## REFERENCIAS

[1] 4º Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica, Situación de las Superficies limitadoras de Obstáculos en Aeropuertos del SNA, Pitrelli S, Faut R., Di Bernardi A

## Bibliografía

Anexo 14 - Volumen I: Diseño y operaciones de aeródromos - Organización de Aviación Civil Internacional, Sexta Edición, julio 2013.

Regulaciones Argentinas de Aviación Civil. Parte 154. Diseño de Aeródromos.

Trabajos realizados en la UIDET "GTA-GIAI", Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería de la UNLP

## ENERGÍAS LIMPIAS Y CAMPOS ENERGÉTICOS RENOVABLES EN AEROPUERTOS DEL SISTEMA NACIONAL (SNA)

Ana Urano y Alejandro Di Bernardi

Grupo Transporte Aéreo – UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina Correo electrónico: [ana\\_u23@hotmail.com](mailto:ana_u23@hotmail.com)

*Palabras claves: Energías, limpias, renovables, aeropuertos, SNA*

Los aeropuertos, como toda instalación de gran envergadura de una cadena de producción y servicio, requieren de energía para su operación y gestión por lo que el presente trabajo busca analizar las diferentes posibles energías limpias (solar, eólica, hídrica, bioenergética, mareomotriz y undimotriz) y los aeropuertos que podrían sustentarse en ellas de acuerdo al mayor predominio en la región en la cual se encuentran emplazados dichos campos de vuelo.

Para ello se analizan de manera general las diferentes energías renovables existentes y las más utilizadas en el país, junto a un mapeo que permite la caracterización preliminar de las energías mencionadas según criterios definidos para tal efecto y los aeropuertos del sistema nacional de aeropuertos (SNA) que podrían beneficiarse de dicha situación y ayudar así reducir los potenciales daños ambientales priorizando la sostenibilidad ambiental.

El presente estudio se encuentra encolumnado con los objetivos del Comité de Protección Ambiental Aeronáutica (CAEP), conformado por la Organización de aviación civil internacional (OACI), y particularmente con los del Grupo de Trabajo 3 (WG3) centrados en la mitigación de las emisiones gaseosas.

### INTRODUCCIÓN

Las energías renovables han ganado protagonismo en los últimos años y se han establecido en todo el mundo como una necesidad. Su rápido crecimiento ha sido impulsado, no solo por la necesidad de bajar los gases efecto invernadero que los sistemas tradicionales aportan al calentamiento global sino también por las nuevas tecnologías involucradas, las mejores eficiencias en los sistemas intervinientes, el acceso a nuevas fuentes de financiación, la mayor demanda del mercado eléctrico, la posibilidad de escalamiento de la demanda / generación, las nuevas políticas supranacionales y nacionales de fomento y el estímulo a la implementación de estas energías limpias entre otros tantos considerandos. Estas situaciones, entre otras tantas, han permitido la generación de nuevos mercados que contemplan e impulsan el desarrollo de éstas energías.

Por otra parte durante la 21ª Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático realizada en París en el 2015, la gran mayoría de los países presentes se comprometieron a fomentar y estimular el uso de energías renovables. A su vez varios estados presentes se comprometieron a revisar y reformar sus políticas de subsidios a los combustibles fósiles generando así un precedente significativo que pretende impulsar la energía renovable.

Paralelamente la Argentina viene fomentando, desde hace varios años, el desarrollo de energías verdes en virtud de los recursos, capacidades y potencialidades disponibles que el amplio territorio nacional ofrece para abastecer la creciente demanda local en lo que a energías renovables se refiere.

En este contexto en septiembre de 2016, el gobierno nacional, lanzó una licitación para mejorar el suministro energético a través de energías verdes. El proyecto contempla como la instalación de 1.000 megavatios de las llamadas energías limpias, divididas de la siguiente manera: eólica 600MW, solar 300MW, biomasa 65MW, hidroeléctrica 20MW y biogás 15MW.

## **METODOLOGÍA**

Para el presente trabajo se analizan las fuentes de información disponible en la web en relación a los potenciales de energía renovable en el país, que luego se aplican al caso de estudio mediante mapeos de los aeropuertos del sistema nacional aeroportuario en concordancia con los correspondientes mapeos de energías con la finalidad de superponer las informaciones y conseguir una observación final.

Inicialmente se tomaron como referenciaseis tipos de regiones clasificadas en grados A, B, C, D, E y F, siendo A la de mayor potencial energético y F la de menor potencial. No obstante ello y con el fin de acotar el desarrollo del presente análisis sólo se consideran aquellas regiones que, a nuestro entender, presentaban mayor potencial energético según cada una de las energías consideradas.

En este contexto se contemplan las zonas A como los puntos de mayor aprovechamiento energético, las B como la zona intermedia y C como la zona media. Quedando el restos de las zonas (D, E y F) como no alcanzadas.

## **DESARROLLO**

La problemática resulta compleja, extensa y diversa por lo que a continuación solo se ponen en evidencia algunas consideraciones generales sobre cada tipo de energía, su situación en Argentina y su relación con los campos de vuelo en función de los criterios anteriormente indicados (A, B, y C), indicando además aquellos aeropuertos no alcanzados ( NA) por la energía considerada.

En este contexto se expone a continuación las siguientes energías limpias que pueden ser consideradas para el desarrollo energético del país y su aplicación a los aeropuertos bajo análisis: energía solar, energía eólica, energía geotérmica, bioenergía, energía hidráulica, energía marítima (undimotriz y mareomotriz).

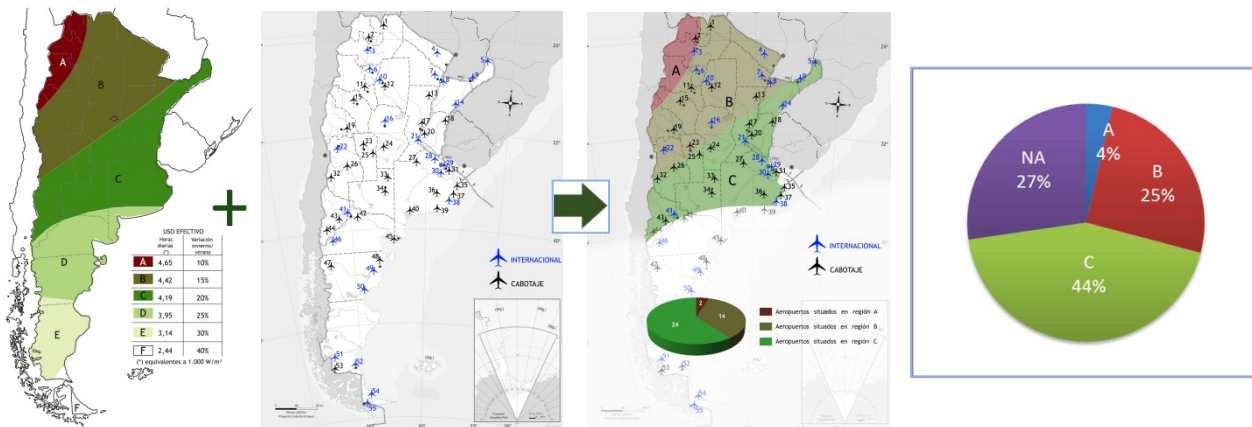
Las presentes no son limitativas ni excluyentes de otras energías que pudieran surgir como opciones válidas.

### **Energía Solar**

Considerando que la energía solar es aquella que proviene de la actividad electromagnética del sol y que la misma puede ser captada por diferentes dispositivos como: concentrados parabólicos, células fotovoltaicas, colectores térmicos, y helióstatos entre otros para luego transformarla en energía eléctrica o mecánica según sea el caso.

Contemplando que el noroeste argentino es de los más beneficiados en cuanto a energía solar se trata ya los porcentajes de variación solar verano/invierno son relativamente bajos del 10 al 20% contemplando en la región A4,65 horas de uso efectivo para  $1.000 \text{ W/m}^2$ , en la B4,42 hs, y en la C4,19 hs.

Resulta entonces que al cruzar esta información con la ubicación de los aeropuertos del SNA surgen los siguientes mapeos que evidencian que solo 2 aeropuertos del sistema se encuentran en la zona A, 14 en la B, y 24 en la C. Los restantes 15 no están alcanzados según los criterios establecidos

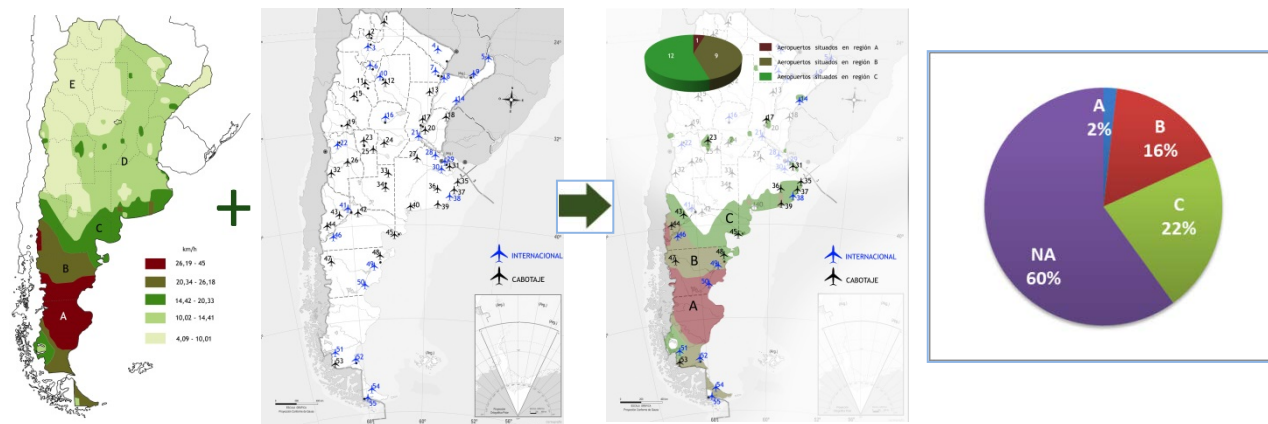


### Energía eólica

Considerando que la energía eólica es aquella que se obtiene al captar la energía cinética de las corrientes de aire de la atmosfera terrestre y que la manera de aprovechar esta energía es través de la utilización de molinos dispuestos en granjas eólicas que permiten transformar la energía cinética en energía eléctrica a través de generadores eléctricos.

Contemplando además que la Argentina tiene cerca del 70 % de su territorio vientos cuya velocidad media anual, medida a 50 metros de altura sobre el nivel del suelo superan los 6 m/s.y teniendo en cuenta los siguientes datos para la región A= 26,19 a 45 km/h, la B= 20,34 a 26,18 km/h y la C=14,2 a 20,33 km/h.

Resulta entonces posible trazar mapas que permiten evidenciar esto potenciales energéticos en concordancia con los aeropuertos del SNA.



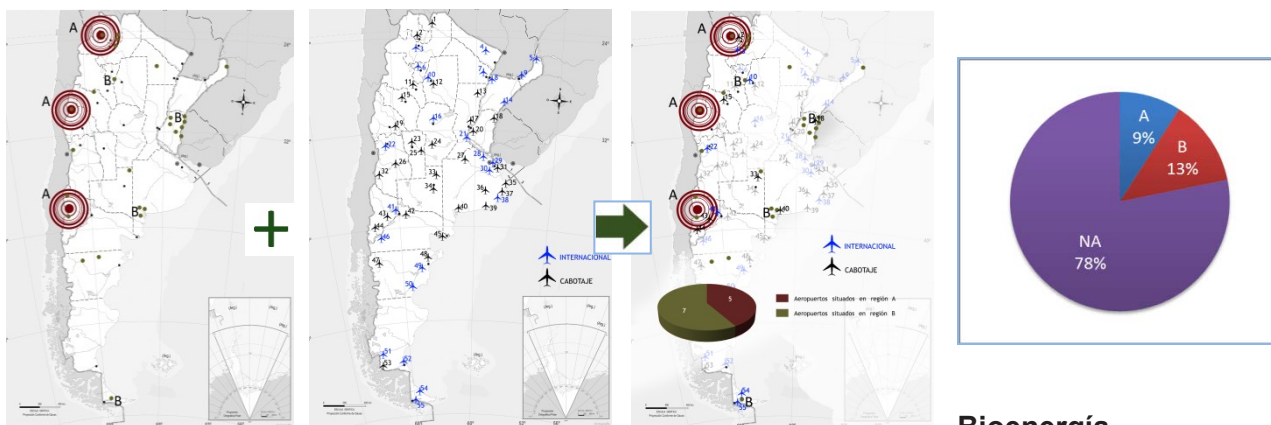
En este contexto se puede apreciar que solo un aeropuerto del SNA se encuentra en la zona A, 9 en la B, y 12 en la C. Los restantes 33 no están alcanzados según los criterios establecidos

### Energía geotérmica

Considerando que la energía geotérmica es aquella que proviene de interior de la tierra y que se la puede aprovechar a través de la captación y canalización de sus líquidos y vapores hacia intercambiadores de calor o bien hacia turbinas generadoras de electricidad entre otras tantas aplicaciones.

Contemplando además que en Argentina, existen sobre la cordillera de los Andes puntos de captación con alto potencial energético denominados A por ser las regiones que cuentan con mayor recurso geotérmico por cuanto se consigue vapor saturado siendo estos Tuzgle (Jujuy), Valle del Cura (San Juan), Domuyo (Neuquén) y en Copahue-Caviahue (Neuquén), mientras que las zonas B son aquellas localizaciones donde se logra temperaturas aproximadas cercanas a los 100°C.

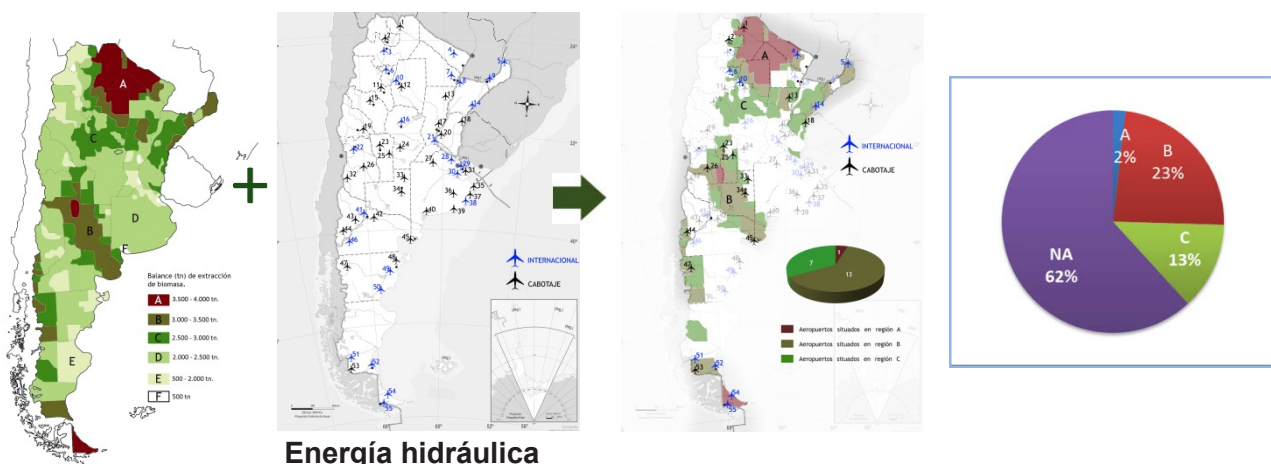
Surge entonces que al realizar el cruce con los mapas del SNA que 5 aeropuertos se encuentran en la zona A mientras que 7 en la B, quedando así el resto de los 55 como no están alcanzados por esta energía según los criterios establecidos



Considerando que la bioenergía es aquella energía que proviene del aprovechamiento de la materia orgánica e industrial residual y que la misma puede ser captada a través de los gases que estas generan en su procesamiento y que ésta puede ser convertida en energía eléctrica a través de diferentes dispositivos termo – mecánicos.

Contemplando además que en Argentina el potencial energético de este tipo de recursos es significativo en todo el país, pero que para el presente análisis solo se consideran las regiones A como aquellas que producen entre 3.500 tn. a 4.000 tn. de biomasa por año, las B entre 3.000 y 3.500 tn /año y las C entre 2.500 y 3.000 tn por año.

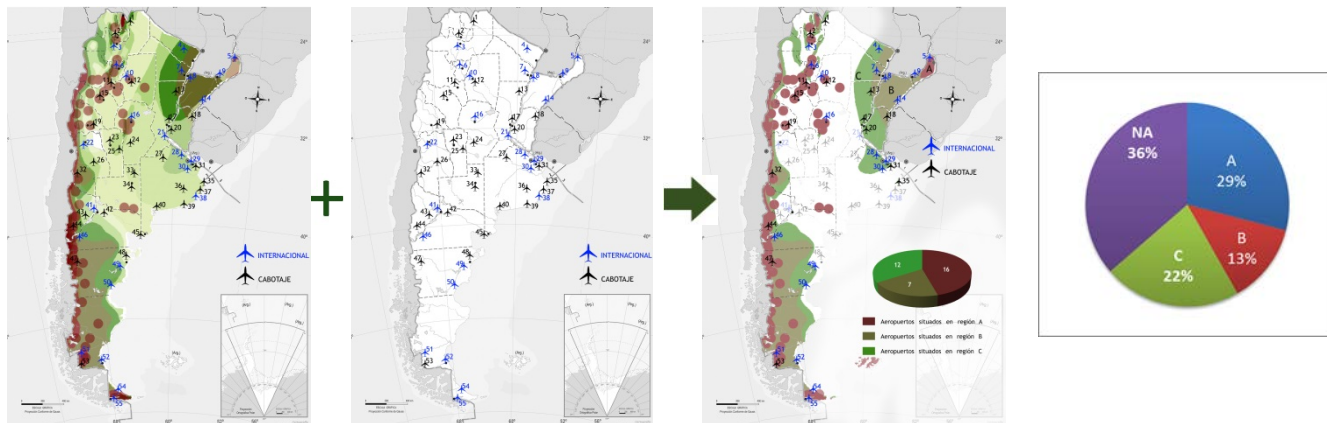
Surge entonces que al realizar el cruce con los mapas del SNA que solo 1 aeropuerto se encuentra en la zona A, 13 en la B y 7 en la C, quedando los restantes 34 como no alcanzados por esta energía según los criterios establecidos





Considerando que la energía hidráulica es aquella que se obtiene del aprovechamiento de las energías cinéticas y potencial de corrientes del agua y saltos de agua, y que las mismas pueden ser transformadas en energía eléctrica a través de diferentes mecanismos.

Contemplando además, que el mayor potencial de energía hidroeléctrica en Argentina se encuentra principalmente en la Cordillera de los Andes y en las Cataratas del Iguazú.



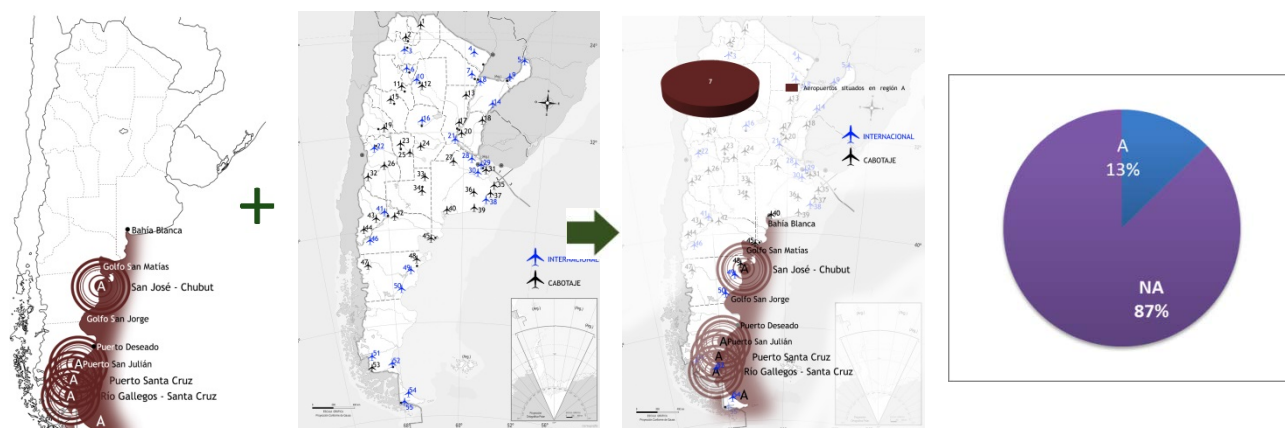
Surge entonces que al realizar el cruce con los mapas del SNA que 16 aeropuertos se encuentran en la zona A, 7 en la B y 12 en la C, quedando los restantes 20 como no están alcanzados por esta energía según los criterios establecidos

### Energía marítima (mareomotriz y undimotriz)

Considerando que la energía mareomotriz aprovecha el ciclo de las mareas, obteniendo así electricidad gracias a las diferencias de cota entre la plena y baja mar. Y teniendo en cuenta que la energía undimotriz aprovecha la energía de las olas para transformarla en energía eléctrica a través de generadores.

Contemplando además, que la Argentina cuenta con una costa amplia y extensa para generar energía a través de estas aplicaciones, considerando además que se estima un potencial energético de hasta 40.000 MW y que nuestra costa presenta olas con un promedio de altura que oscila entre el metro y los dos surge como óptimo todo el perfil costero por debajo de Bahía Blanca como óptimo para este tipo de energías.

Surge entonces que 7 aeropuertos del SNA podrían aprovechar estas energías para sus consumos.



### RESULTADOS

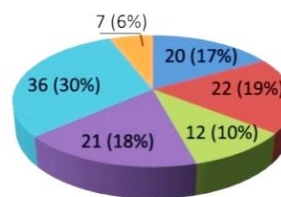
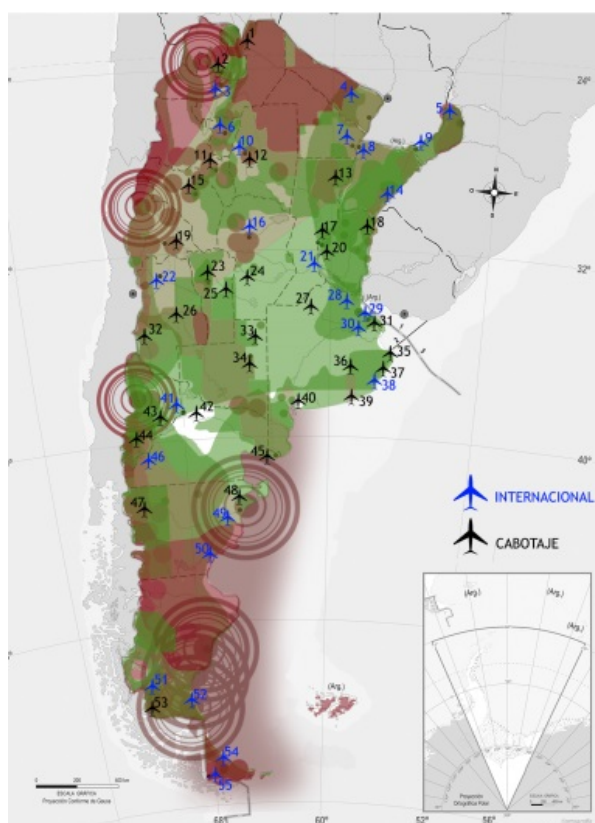


Integrando los aeropuertos con las energías analizadas surge el siguiente cuadro resumen donde se aprecia para cada aeropuerto la energía que este podría aprovechar

A E R O P U E R T O S	E. SOLAR	E. EÓLICA	EGOTÉRMICA	BIOMASA	E. HIDRÁULICA	MEMOTRIZ UNIDIMOTRIZ
1- A. de Tartagal "Gral Enrique Mosconi"	B	-	-	A	C	-
2- A. de Jujuy "Gobernador Horacio Guzmán"	A	-	A	-	A	-
3- A. Internacional de Salta "Martín Miguel de Güemes"	A	-	A	-	C	-
4- A. de Internacional de Formosa "El Pucu"	B	-	-	B	C	-
5- A. de Cataratas "Cataratas del Iguazu"	C	-	-	B	A	-
6- A. de Tucuman "Teniente Benjamín Matienzo"	B	-	-	C	A	-
7- A. de Resistencia "José de San Martín"	B	-	-	-	B	-
8- A. de Corrientes "Dr. Fernando Piragine Niveyro"	B	-	-	-	B	-
9- A. de Posadas "Libertador General San Martín"	C	-	-	-	B	-
10- A. Internacional Termas de Río Hondo	B	-	B	C	A	-
11- A. de Catamarca "Coronel Felipe Varela"	B	-	-	-	A	-
12- A. de Santiago del Estero "Vcom. Ángel de la Paz Aragónes"	B	-	-	-	A	-
13- A. de Reconquista "Daniel Jukic"	B	-	-	B	C	-
14- A. de Paso de los Libres	C	C	-	B	B	-
15- A. de La Rioja "Capitán Vicente A. Almonacid"	B	-	B	-	A	-
16- A. Internacional de Córdoba "Ing. A. Taravella"	B	-	-	-	A	-
17- A. de Sauce Viejo	C	C	-	-	C	-
18- A. de Concordia "Comodoro Pierrestegui"	C	-	B	C	B	-
19- A. de San Juan "Domingo Faustino Sarmiento"	B	-	-	-	A	-
20- A. de Paraná "General Justo José de Urquiza"	C	-	-	-	C	-
21- A. Internacional Rosario "Islas Malvinas"	C	-	-	-	-	-
22- A. Internacional de Mendoza "Francisco Gabrielli"	B	-	-	-	-	-
23- A. de San Luis "Brigadier Mayor César R. Ojeda"	B	C	-	C	-	-
24- A. de Río Cuarto "Área de Material"	C	-	-	-	-	-
25- A. de Villa Reynolds	C	-	-	C	-	-
26- A. de San Rafael "S.A. Santiago Germano"	C	-	-	B	-	-
27- A. de Junín	C	-	-	-	-	-
28- A. de San Fernando	C	-	-	-	C	-
29- A. "Jorge Newbery"	C	-	-	-	C	-
30- A. Internacional de Ezeiza "Ministro Pistarini"	C	-	-	-	C	-
31- A. de La Plata	C	-	-	-	C	-
32- A. de Malargüe "Comodoro D. Ricardo Salomón"	C	-	-	-	A	-
33- A. de General Pico	C	-	B	C	-	-
34- A. de Santa Rosa	C	-	-	B	-	-
35- A. de Santa Teresita	C	C	-	-	C	-
36- A. de Tandil "Héroes de Malvinas"	C	C	-	-	-	-
37- A. de Villa Gesell	C	C	-	-	-	-
38- A. Internacional de Mar del Plata "Astor Piazzolla"	C	C	-	-	-	-
39- A. de Necochea "Edgardo Hugo Yelpo"	-	B	-	-	-	-
40- A. de Bahía Blanca "Comandante Espora"	-	-	B	-	-	A
41- A. de Neuquén "Presidente Perón"	C	-	A	-	-	-
42- A. de Gral. Roca "Dr. Arturo Umberto Illia"	-	-	-	-	-	-
43- A. de Cutral Có	C	C	A	-	-	-
44- A. de Chapelco "Aviador Carlos Campos"	-	B	A	C	A	-
45- Aeropuerto de Viedma "Gobernador Castello"	-	C	-	B	-	A
46- A. Internacional de S. C. de Bariloche "Teniente L. Candelaria"	-	B	-	-	B	-
47- A. de Esquel "Brigadier General Antonio Parodi"	-	B	-	B	A	-
48- A. de Puerto Madryn "El Tehuelche"	-	C	-	-	-	A
49- A. de Trelew "Almirante Marco Andrés Zar"	-	B	-	-	C	A
50- A. de Comodoro Rivadavia "Gral. Enrique Mosconi"	-	A	-	-	C	A
51- A. El Calafate "Comandante Armando Tola"	-	C	-	B	A	-
52- A. de Río Gallegos "Piloto Civil Norberto Fernández"	-	B	-	B	B	A
53- A. de Río Turbio "El Turbio/28 de Noviembre"	-	B	-	B	A	-
54- A. de Río Grande "Gob. Ramón Trejo Noel"	-	B	B	B	A	A
55- A. de Ushuaia "Malvinas Argentinas"	-	B	B	B	A	-

Por otra parte para una mejor visualización lo anterior se plasma en un mapa donde se aprecian las diferentes energías y su relación con los aeropuertos. Para ello se ha tomado como referencia colores con distintos grados de calidez, donde puede entenderse que aquellas áreas con colores cálidos (distintas escalas de bordo) son las regiones de grado A en lo que a recurso de energía renovables se refiere, en aquellos sectores donde el color marrón predomina son regiones de grado B y las zonas con colores fríos (distintas escalas de verde) son regiones de grado C.

Así mismo se presenta un cuadro resumen con la cantidad de aeropuertos con posible utilización de energías renovables y otro con los porcentajes y cantidad de aeropuertos que admiten una, varias o ninguna energía renovable:



- Aeropuertos con potencialidad en Energía Solar.
- Aeropuertos con potencialidad en Energía Eólica.
- Aeropuertos con potencialidad en Energía Geotérmica.
- Aeropuertos con potencialidad en Bioenergía.
- Aeropuertos con potencialidad en Energía Hidráulica.
- Aeropuerto con potencialidad en Energía Marítima.

Aeropuerto que admite:	Cantidad	Tipo de aeropuerto	
		✈ Cabotaje	✈ Internacional
1 tipo de energía	5	3	2
2 tipos de energía	22	12	10
3 tipos de energía	20	7	13
4 tipos de energía	6	2	4
5 tipos de energía	1	-	1
ningún tipo de energía	1	1	-

## CONCLUSIÓN

A lo largo y ancho de la Argentina existen una cierta cantidad de zonas cuyos aeropuertos podrían aprovechar la potencialidad que las energías limpias ofrecen contribuyendo así a reducir los efectos contaminantes que las energías tradicionales aportan al medio ambiente.

De acuerdo a los resultados obtenidos según los criterios establecidos (A, B y C) surge que 54 de los 55 aeropuertos considerados se encuentran en el área de influencia de las zonas con mayor potencialidad en lo que recursos sustentables se refiere. Solo el aeropuerto de Gral. Roca “Dr. Arturo Umberto Illia” no contaría con la capacidad de aprovechar energía renovable alguna. Sin embargo esta situación no es del todo concreta por cuanto la precisión de las trazas seleccionadas no resultan exactas y finales sino que muestran un límite aproximado de potencialidad. En este contexto es de suponer que el aeropuerto de referencia tiene la capacidad de aprovechar con menor eficiencia algunas de las energías presentes en la región.

Con esta información queda entonces profundizar los estudios para determinar la mejor opción para cada aeropuerto en función de sus contextos de operación y desarrollo.

## REFERENCIAS

- <http://www.orsna.gov.ar/>
- <http://opcionrenovable.com.ar/>
- <http://www.argentinaeolica.org.ar/>
- <http://www.infoleg.gob.ar/>
- <http://www.fao.org/>
- <http://smn.gov.ar/>
- <http://www.twenergy.com>
- <http://www.ina.gob.ar/>

## ANÁLISIS DE FLOTAS OPERATIVAS EN REGIONES DE LA ORGANIZACIÓN DE AVIACIÓN CIVIL INTERNACIONAL

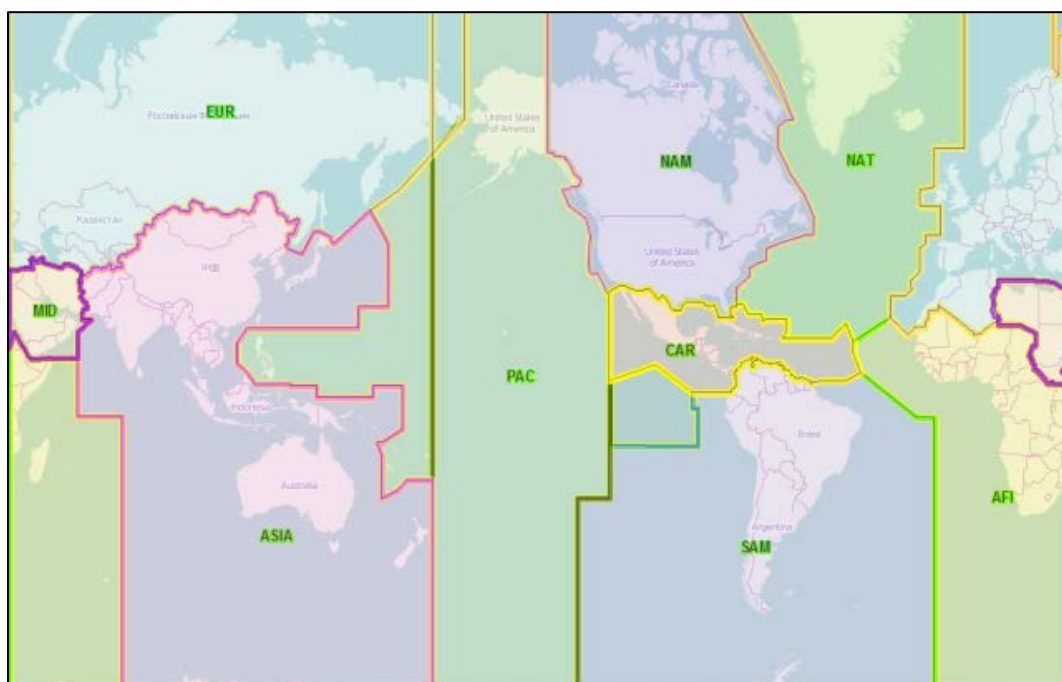
Gabriela Rodríguez Acevedo, Javier Henríquez Matteus, Isidro Porras, Ezequiel Burela, Stefanía Romero, Alejandro Di Bernardi

Grupo Transporte Aéreo – UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico [gabriela.rodriquez@ing.unlp.edu.ar](mailto:gabriela.rodriquez@ing.unlp.edu.ar)

**Palabras Claves:** Regiones OACI, Aerolíneas, Características Flota, Destinos.

### INTRODUCCIÓN

Actualmente, la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) divide el mundo en las siguientes nueve Regiones: África – Océano Índico (AFI), Asia (ASIA), Caribe (CAR), Europa (EUR), Oriente Medio (MID), Norte América (NAM), Atlántico Norte (NAT), Pacífico (PAC) y Sudamérica (SAM). Se muestra a continuación la ubicación geográfica de las mismas:



Ubicación geográfica de las Regiones

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar la flota aerocomercial de las regiones OACI: CAR, PAC, AFI y SAM; tomando como parámetros: el fabricante y el modelo, el número de serie, la matrícula, la edad y la motorización de cada aeronave. Además, identificar los principales puntos de operación de las distintas aerolíneas activas de cada región, para así obtener una base de datos preliminar para futuros análisis de operación, planificación aeroportuaria y contaminación.

De esta manera, el documento puntualiza la situación de la flota aerocomercial de las aerolíneas operativas, a Junio de 2015, con base en información publicada por los fabricantes de aviones, publicaciones de consultoras de aviación y divulgaciones aeronáuticas obtenidas a través de Internet.

## DESARROLLO

En virtud de lo expuesto, el análisis presentado consta de tres etapas de desarrollo, un análisis de las aerolíneas, un análisis de los países y un análisis de la región.

En primera instancia, se define una fecha base o de referencia (junio de 2015) con el fin de establecer el mismo tiempo de análisis para todas las aeronaves, y así, que los distintos parámetros (cantidad de aeronaves, edades promedio, etc.) puedan ser comparables.

Hecho esto, se identifican los países con aerolíneas activas de cada región.

Seguidamente, dentro de cada país y para cada una de las aerolíneas, se identifica cada aeronave por su número de serie y matrícula correspondiente a su país; lo que permite caracterizarlas detallando: el fabricante, el modelo, el tipo de fuselaje, la edad y la planta poder. Al mismo tiempo, a nivel de la aerolínea, se enumeran los principales destinos y aeropuertos de operación.

Una vez adquirida la información de todas las aerolíneas, por comparación directa se determinan las características generales de cada país. Finalmente, compilando los datos de cada país, se obtienen los rasgos que definen la tendencia regional.

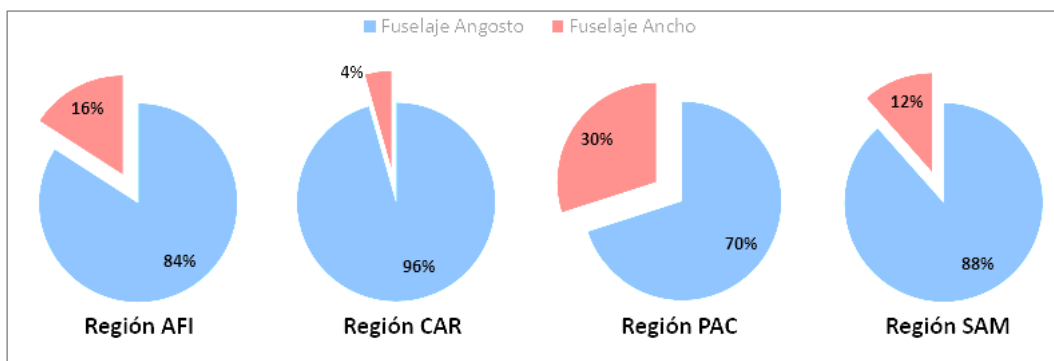
## RESULTADOS

Se muestran a continuación los principales resultados surgidos del análisis.

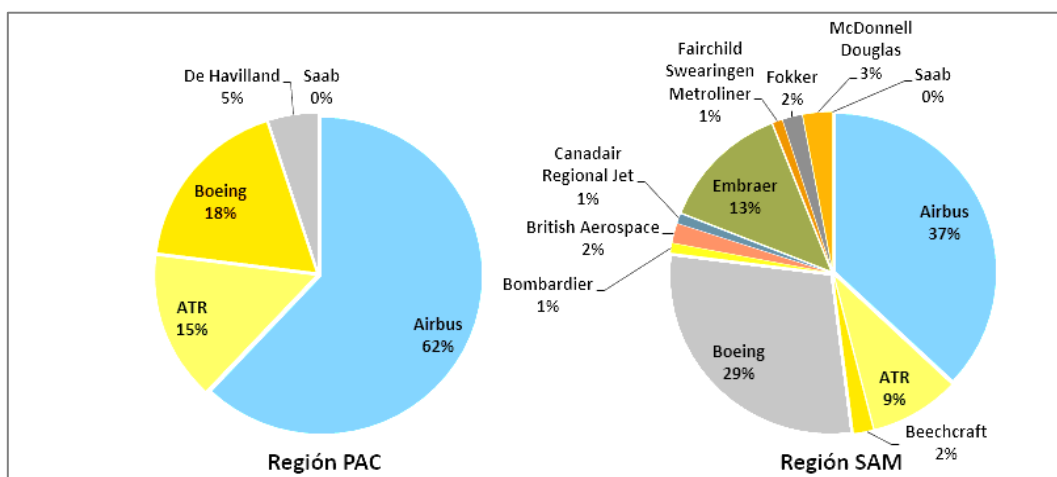
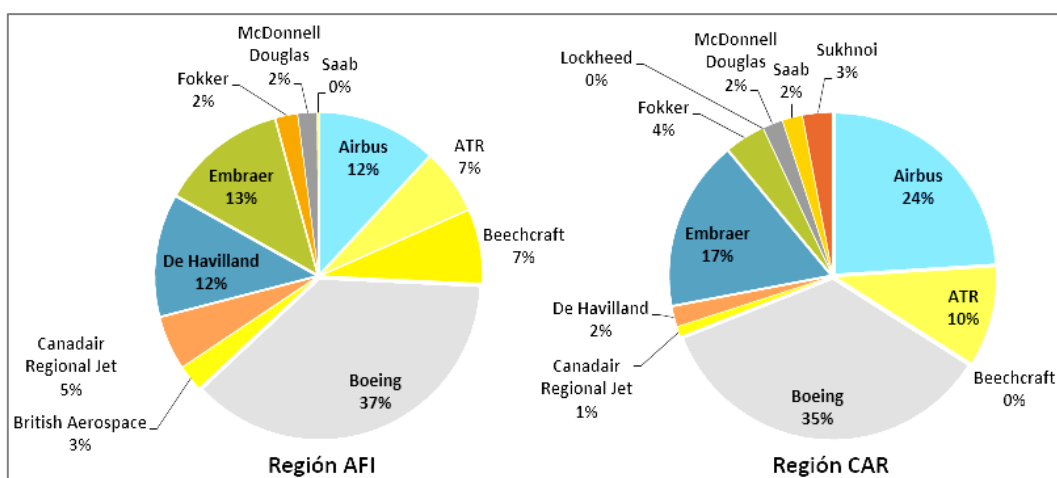
A nivel regional se deriva lo siguiente:

	<b>AFI</b>	<b>CAR</b>	<b>PAC</b>	<b>SAM</b>
<b>Total de países con aerolíneas activas</b>	38	15	9	13
<b>Total de aerolíneas</b>	133	51	23	76
<b>Total de aeronaves</b>	730	569	247	1.143
<b>Tipos de fuselaje</b>				
<b>Fuselaje Angosto</b>	614 (84%)	544 (96%)	173 (70%)	1.011 (88%)
<b>Fuselaje Ancho</b>	116 (16%)	25 (4%)	74 (30%)	132 (12%)
<b>Edad promedio de la flota</b>	15	18,9	12,6	10,3

Características principales de cada región OACI



Distribución regional de las aeronaves por tipo de fuselaje



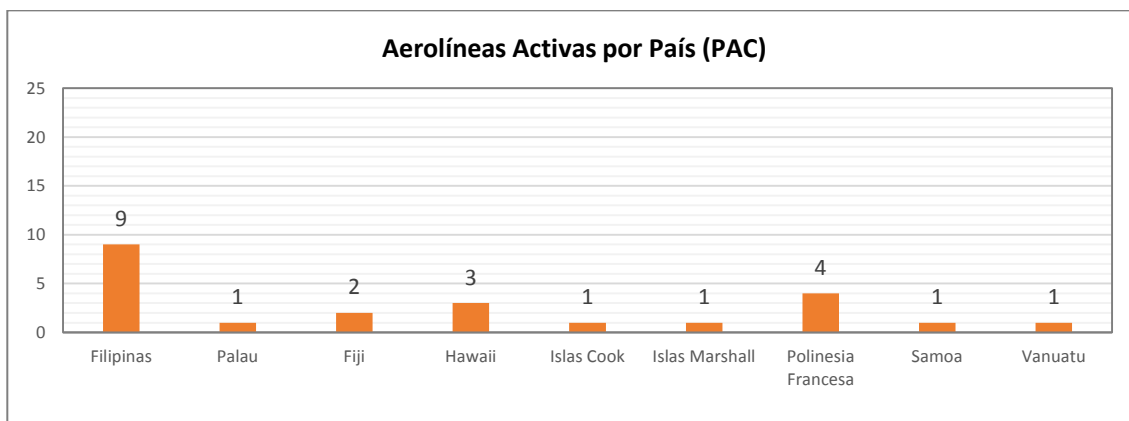
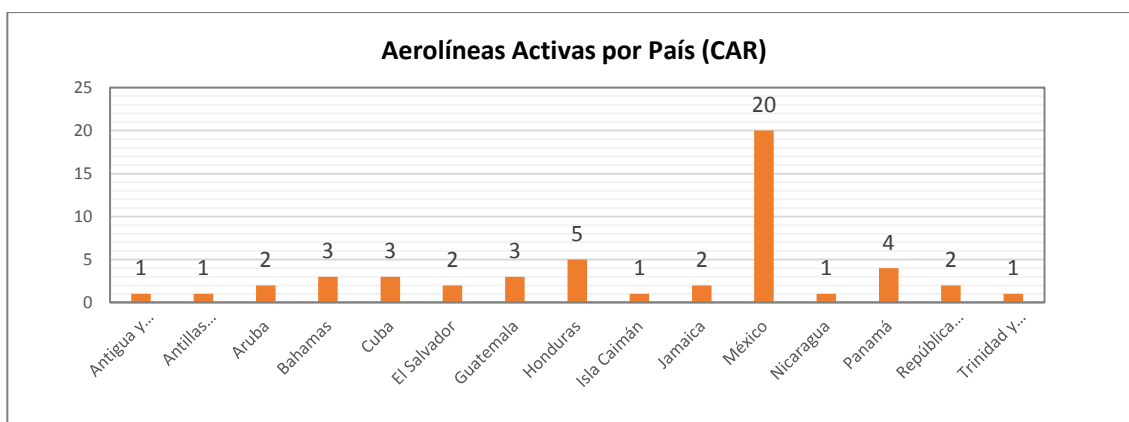
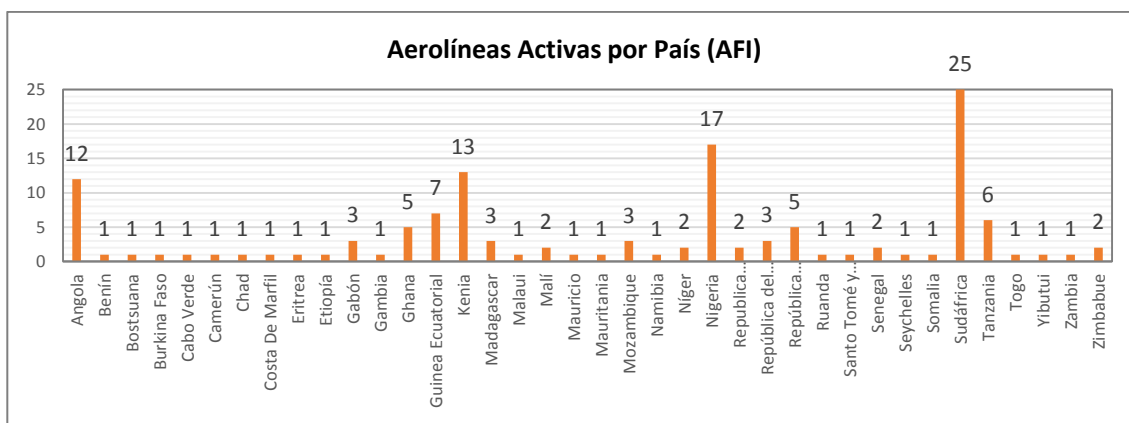
Distribución porcentual de aeronaves según el fabricante

	Aeronave más utilizada	Cantidad	Porcentaje
AFI	Boeing 737-800	59	10%
	DHC-8 400	55	9%
CAR	Airbus A320-200	102	18%

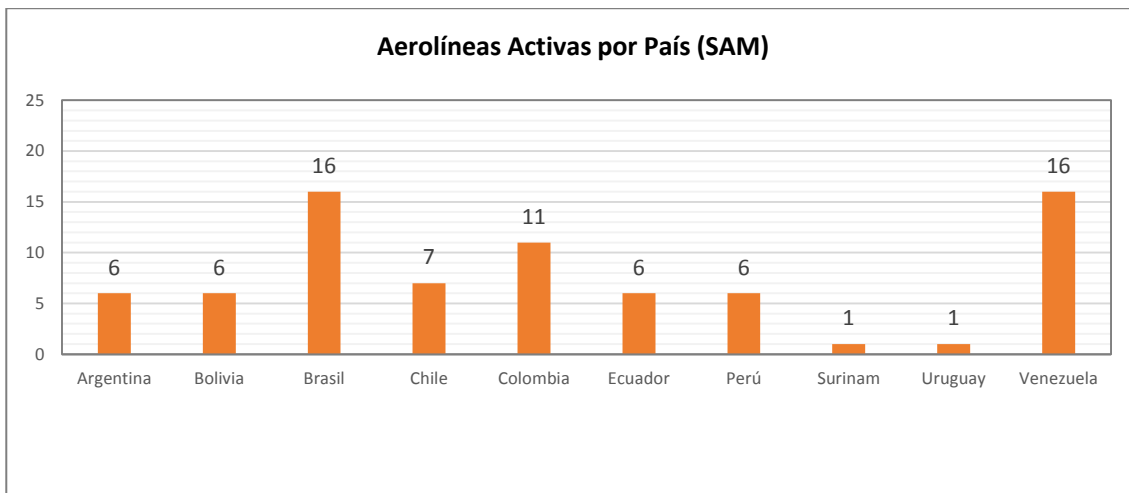
	Aeronave más utilizada	Cantidad	Porcentaje
<b>PAC</b>	Boeing 737-800	100	18%
	Airbus A320-200	67	27%
	ATR 72-200	28	11%
<b>SAM</b>	Airbus A320-200	231	36%
	Boeing 737-800	108	17%

Aeronaves más utilizadas en cada región OACI

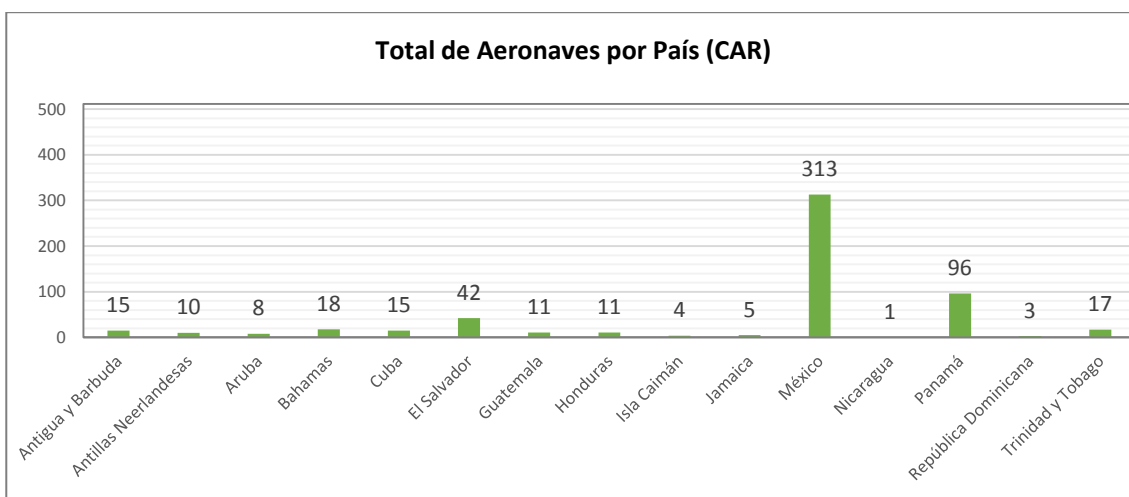
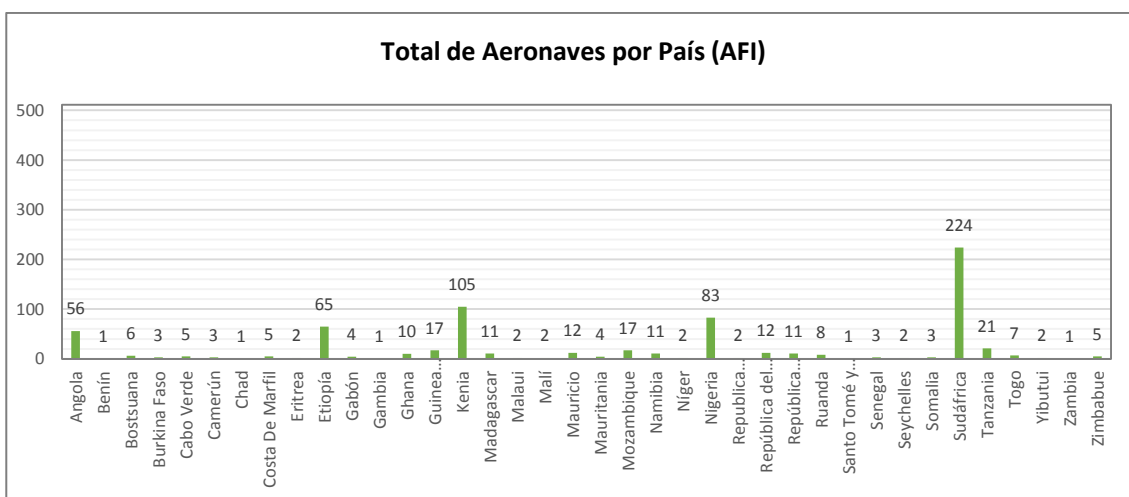
A nivel país los principales resultados obtenidos son:

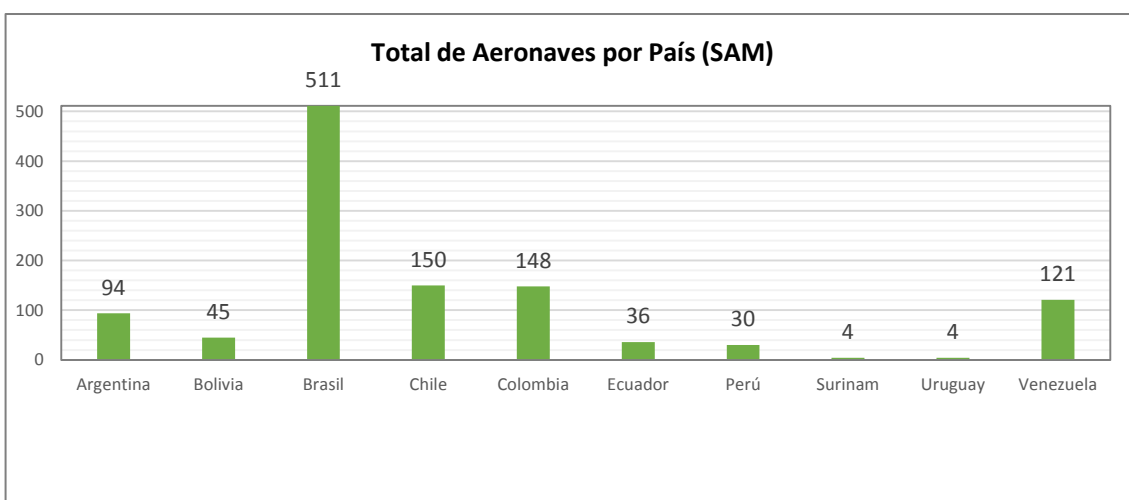
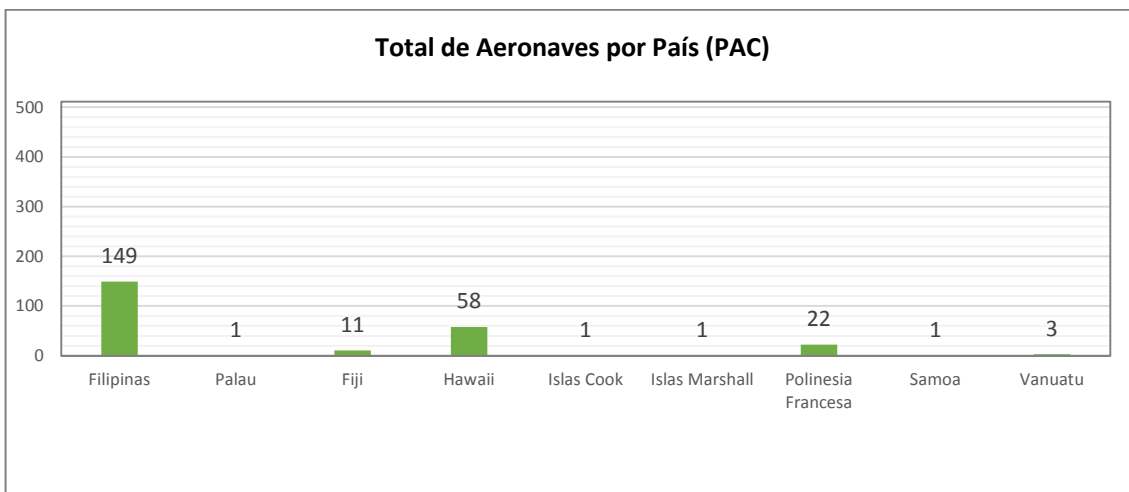




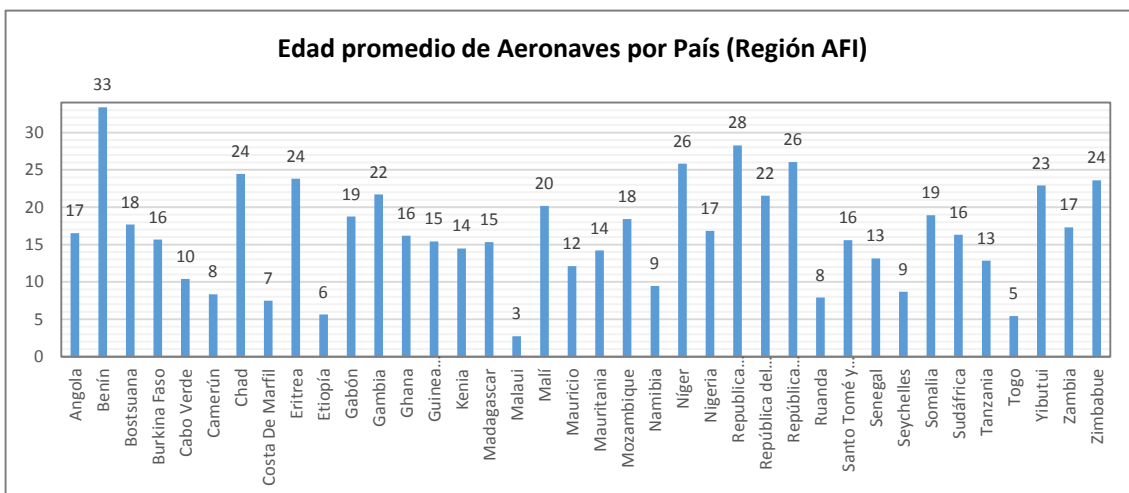


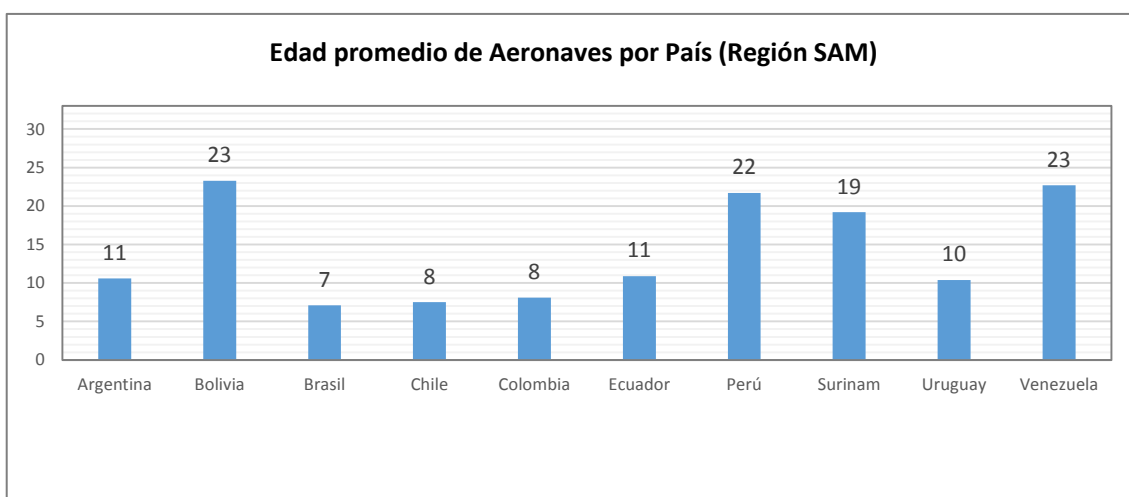
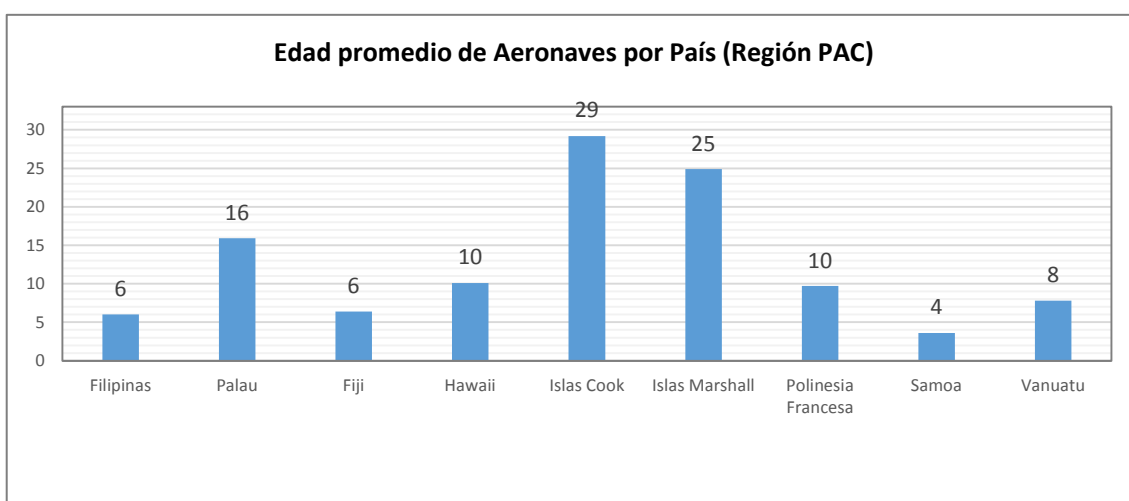
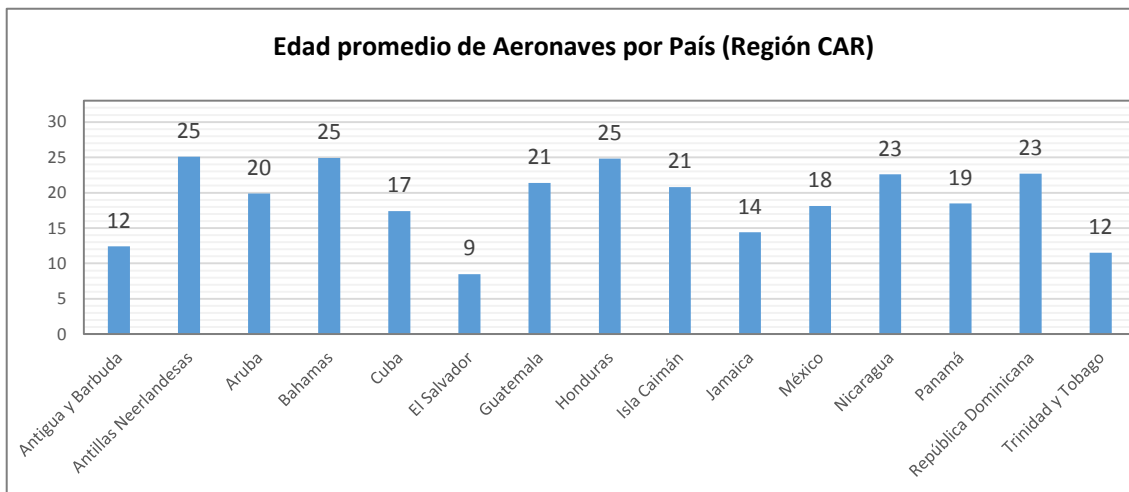
Cantidad de aerolíneas activas por país; todas las regiones





Cantidad de aeronaves por país; todas las regiones





Edad promedio de las aeronaves por país; todas las regiones

## CONCLUSIÓN

Con base en los resultados arrojados por el estudio se demuestra que es la región OACI AFI la que posee la mayor cantidad de países con aerolíneas activas, y a su vez la mayor cantidad de aerolíneas operativas. En contraposición, la región con menor presencia de países y aerolíneas operativas es la región OACI PAC.

La región SAM, con 1.143 aeronaves, es la que tiene la mayor flota operativa entre las cuatro regiones consideradas, seguida por las regiones AFI (730) y CAR (569). Nuevamente, la región PAC (247) se encuentra al final de la clasificación.

La región sudamericana es también la que cuenta con la flota más joven, promediando una edad de 10,3 años. En posiciones intermedias se ubican las regiones PAC Y AFI con 12,6 años y 15 años, respectivamente. La flota operativa en la región CAR se sitúa como la más antigua al tener una edad promedio de 18,9 años.

En todas las regiones se observa la primacía de las aeronaves de fuselaje angosto sobre aquellas de fuselaje ancho, toda vez que las mismas representan el 96% (SAM), 88% (CAR), 84% (AFI) y 70% (PAC) de la flota total activa.

Siguiendo esta línea, las aeronaves A320-200 y B737-800 se perfilan como las más utilizadas en las regiones CAR y SAM, mérito que comparten con los modelos ATR-72 y DHC-8 400 en las regiones PAC y AFI, respectivamente.

Por último, este hecho permite evidenciar el claro dominio de los fabricantes Airbus y Boeing en el mercado aeronáutico latinoamericano, ya que entre ambos se hacen con aproximadamente el 62% de la flota total operativa.

## BIBLIOGRAFÍA

- Para la definición de cada región, se tomaron como referencia las listas de países publicados por OACI a través de sus sitios web regionales.

[http://www.icao.int/Pages/Contact\\_us.aspx](http://www.icao.int/Pages/Contact_us.aspx)

- Para el análisis de las aerolíneas activas, la cantidad de aeronaves y sus características (edad, matrícula, planta poder, etc.), se utilizaron los datos publicados por la consultora de aviación Airfleets.

<http://www.airfleets.es/home/>

- Con referencia a los destinos y aeropuertos principales de operación, se consultaron las páginas oficiales de las aerolíneas activas de cada país.

## **EI DOMINIO TERRITORIAL DE LOS AEROPUERTOS DE MAYOR PORTE SOBRE SU ENTORNO INMEDIATO**

Diego Jiménez Barón, Javier Henríquez Matteus, Gabriela Rodríguez Acevedo, Alejandro Di Bernardi

Grupo Transporte Aéreo – UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico [diego.jimenez@ing.unlp.edu.ar](mailto:diego.jimenez@ing.unlp.edu.ar)

*Palabras Claves: Aeropuerto, Pasajeros, Entorno, Crecimiento, Competitividad.*

El trabajo tiene como objetivo caracterizar el contexto situacional de los aeropuertos cuya infraestructura (instalaciones, equipamientos, etc.) y volumen de operaciones son de tal magnitud que resulta impensable considerar su traslado a otro emplazamiento.

De esta manera, se analiza la evolución de los veinte aeropuertos con mayor tráfico de pasajeros a nivel mundial, toda vez que se identifican los cambios experimentados en su predio aeroportuario durante el periodo 2003-2015. Así mismo, se determina el tipo de interacción entre ambos actores; esto es, si el aeropuerto actúa sobre su entorno o si es el entorno el que obliga a redefinir el predio aeroportuario.

Finalmente, se logra visualizar la importancia que conlleva la planificación aeroportuaria, así como la planificación territorial del entorno aeroportuario inmediato, para de esta forma poder evitar conflictos entre los procesos evolutivos de ambas partes.

### **INTRODUCCIÓN**

Los aeropuertos son sistemas vivos que se encuentran en permanente dinámica de cambio y transformación, producto de las exigencias que la propia actividad le impone como consecuencia de la constante demanda de servicios en contextos de desarrollo económico, social y ambiental de la región en la cual se encuentran emplazados.

Siendo así, para lograr un proceso armónico de crecimiento se debe realizar una planificación aeroportuaria en concordancia con la planificación urbana del entorno inmediato, en la que se prevea el crecimiento del aeropuerto y su entorno en perfecta sintonía y compatibilidad sin interferencias evitando así la competitividad territorial que naturalmente se da entre uno y otro.

Lamentablemente esta situación no siempre se da ya que los aeropuertos, comúnmente, terminan siendo contenidos por tramas urbanas que lo limitan. Esta situación deriva por lo general en tres posibles situaciones: adecuación del aeropuerto al entorno, adecuación del entorno al aeropuerto o bien traslado a nuevo emplazamiento.

### **DESARROLLO**

En este contexto, el análisis y la determinación de la competitividad territorial en los aeropuertos de interés se llevan a cabo como sigue:

A partir de los datos de tráfico anual de pasajeros publicados por el Consejo Internacional de Aeropuertos (ACI), se determinan los veinte aeropuertos del mundo con mayor movimiento de pasajeros en el año 2013.

Una vez definidos los aeropuertos, se recopilan sus datos principales, a saber: los códigos de identificación IATA y OACI, la ubicación geográfica, la localización respecto del centro de la ciudad a la que sirven, la cantidad de pistas operativas, la superficie total del predio aeroportuario, características generales referentes al área terminal y al entorno inmediato, datos históricos, entre otros.

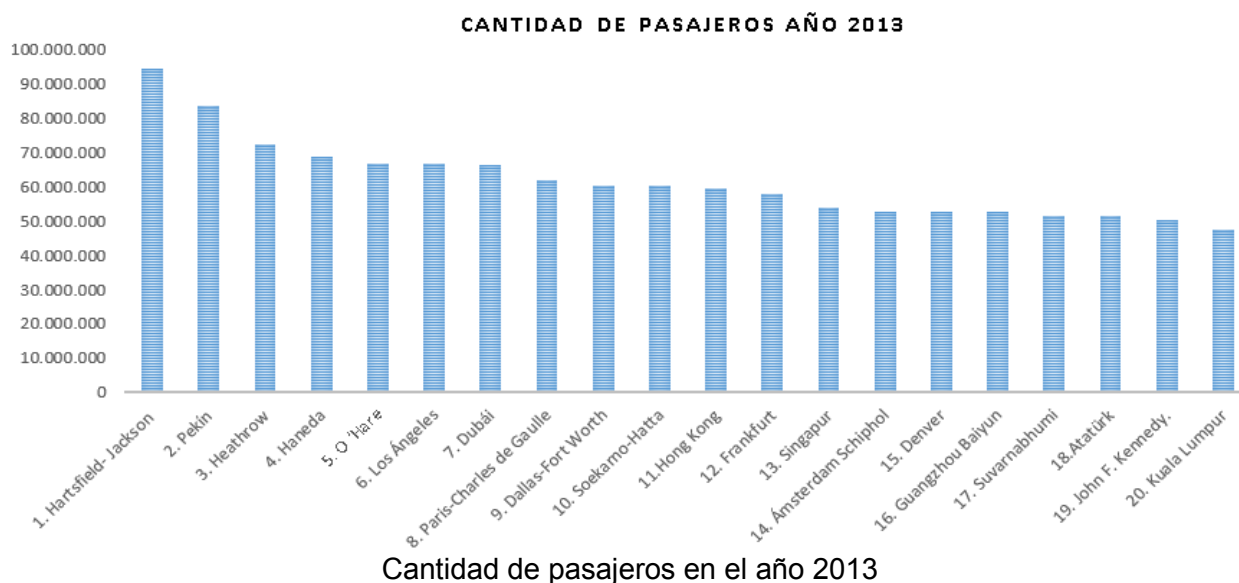
Así mismo, por medio de imágenes satelitales y del programa Free Map Tools, se analiza la interrelación entorno-aeropuerto durante el periodo 2003-2015, determinando así el tipo de evolución en cada caso; es decir, si el aeropuerto se adecuó al entorno o el entorno se adaptó al aeropuerto.

En última instancia, se realiza una aproximación promedio de la relación entre la cantidad de superficie de cada aeropuerto y el volumen de pasajeros que moviliza.

## RESULTADOS

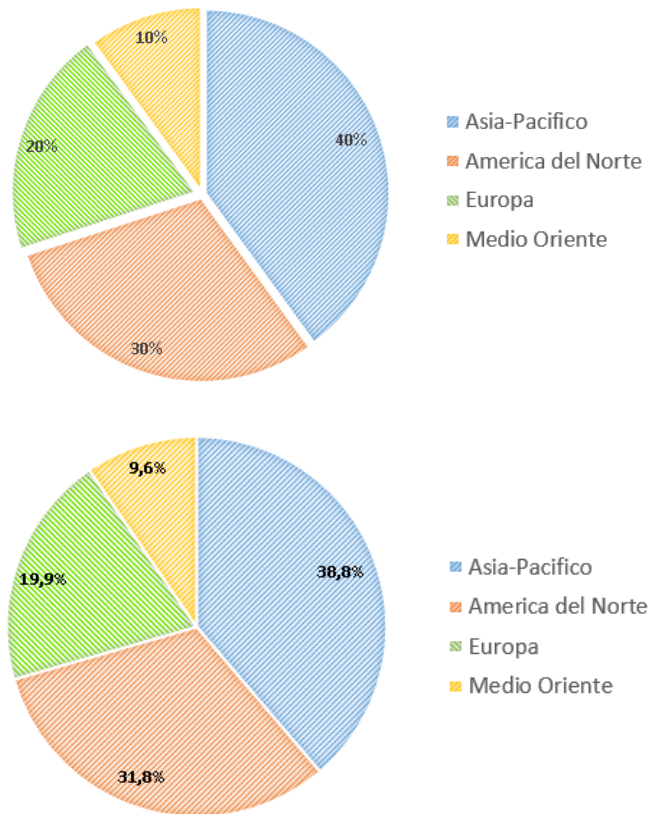
A continuación, se resumen los principales resultados obtenidos del análisis.

En primera instancia, se muestran los 20 aeropuertos de mayor tráfico de pasajeros a nivel mundial, según lo divulgado por el Consejo Internacional de Aeropuertos (ACI) para el año 2013.



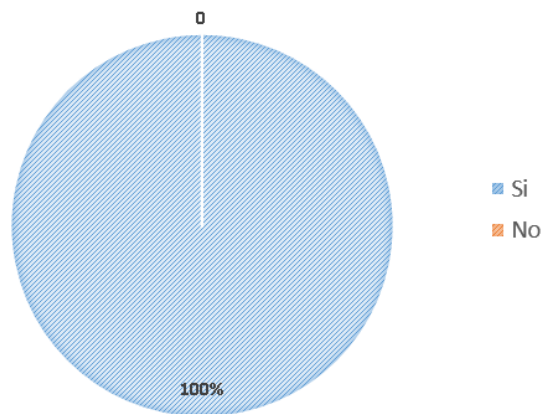
En la siguiente figura se muestra, en primer lugar, la distribución regional porcentual de los aeropuertos considerados y por último, el porcentaje regional sobre el tráfico total de pasajeros alcanzado en el año 2013.





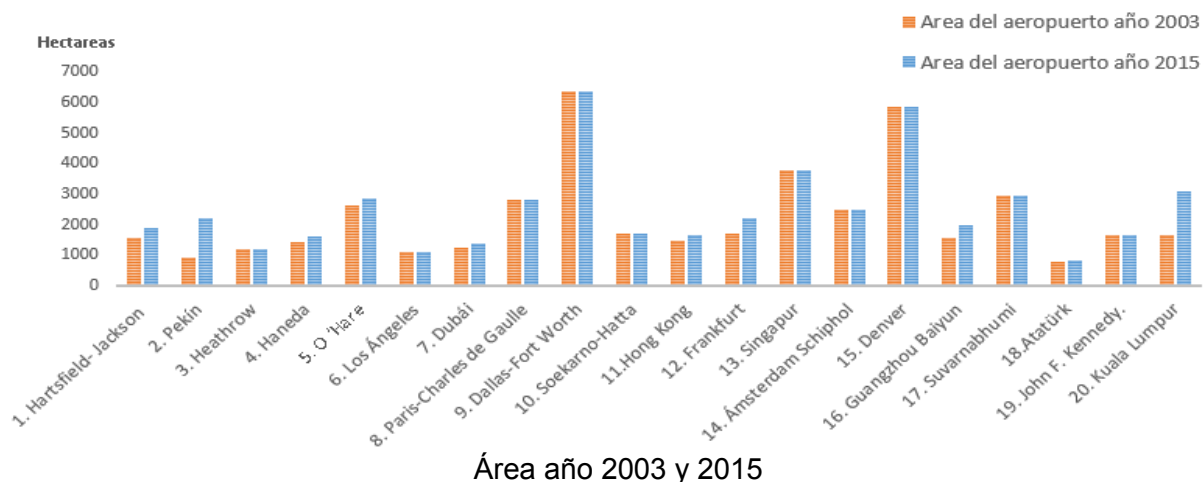
Distribución de aeropuertos y de pasajeros por regiones

Al analizar la evolución de los aeropuertos en el periodo de estudio, se puede observar que la totalidad de ellos sufrieron algún tipo de transformación, pudiendo esta última implicar o no modificaciones en el perímetro del aeropuerto.



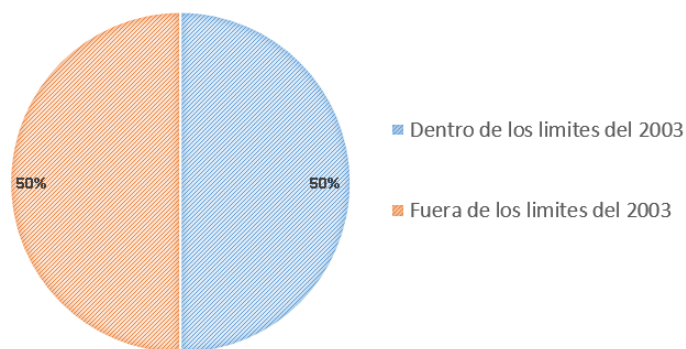
Modificación desde el 2003 hasta el 2015

El gráfico subsecuente compara las superficies del predio aeroportuario respectivas a cada aeropuerto, correspondientes a los años 2003 y 2015.



Área año 2003 y 2015

De esta manera, se advierte que la mitad de los aeropuertos sufrieron modificaciones dentro del cerco perimetral establecido en el año 2003, mientras que los restantes vieron expandidos los límites de sus predios pertinentes.



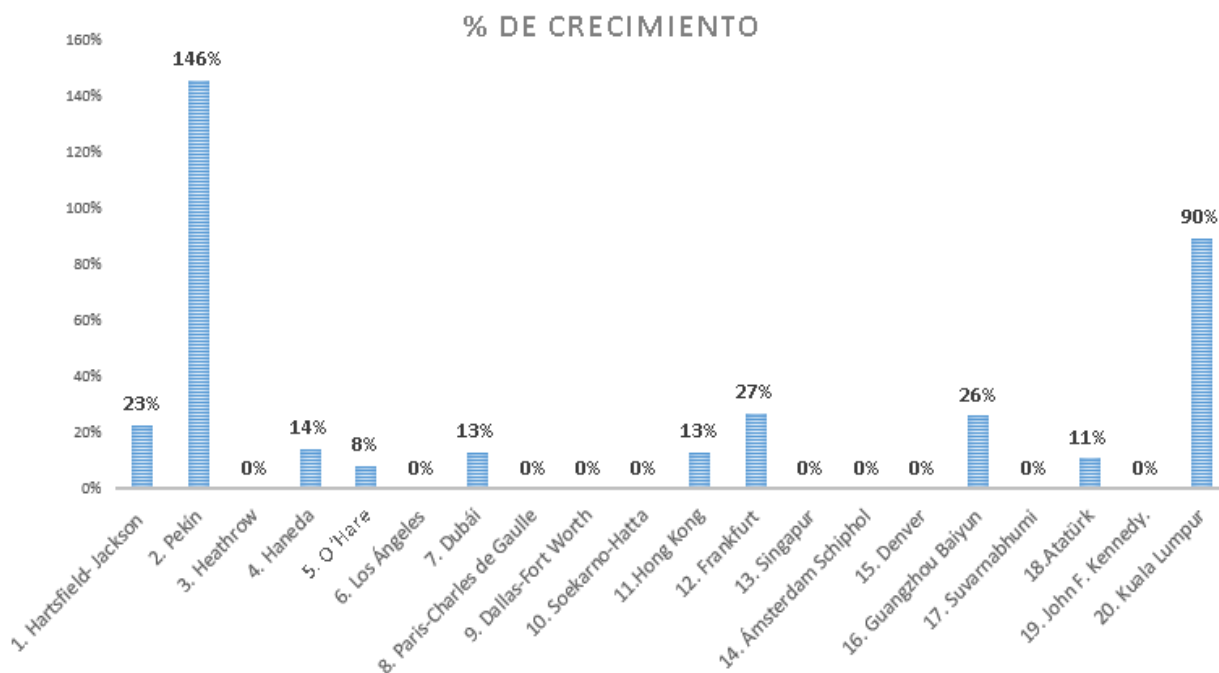
Crecimiento

Se observa además que en el 80% de los aeropuertos que expandieron su perímetro respecto del año 2003, el entorno se adaptó a las modificaciones del aeropuerto. En contraparte, en el 20% restante los aeropuertos se adecuaron a su entorno.



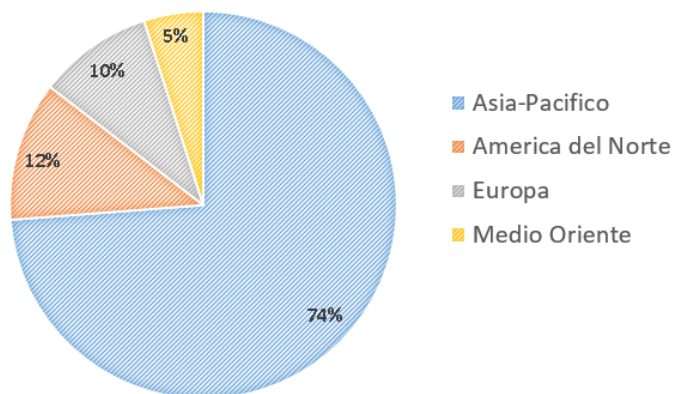
Adaptación

Siendo así, la figura sucesiva muestra el porcentaje de crecimiento de cada aeropuerto.



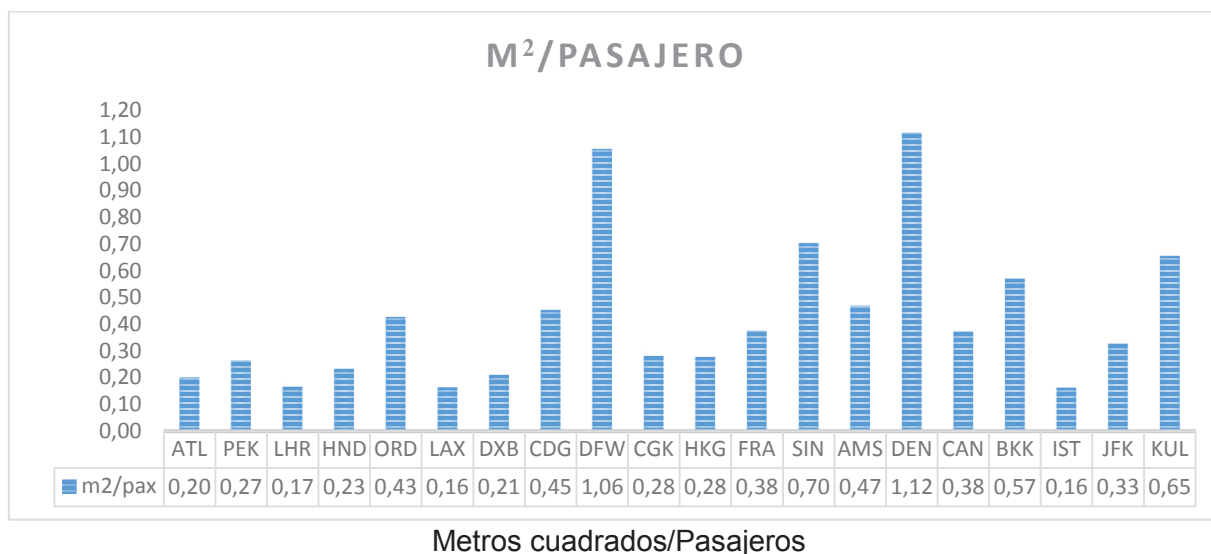
Porcentaje de crecimiento

Siguiendo esta línea, con base en el crecimiento experimentado por estos 10 aeropuertos y en función de su ubicación geográfica, se presenta la distribución porcentual sobre el total de la superficie incrementada entre los años 2003 y 2015 de acuerdo a las regiones geográficas.



Área modificada por región

Finalmente, para cada aeropuerto se computa la relación existente entre el volumen anual de pasajeros movilizados y el total de metros cuadrados de su predio.



Este parámetro constituye un indicador macro que puede proporcionar información preliminar de cuanta superficie es requerida para movilizar determinado volumen de pasajeros, o recíprocamente, qué volumen de pasajeros es capaz de movilizar un aeropuerto.

## CONCLUSIONES

Los resultados evidencian, en cuanto a tráfico de pasajeros, la preponderancia de la región Asia-Pacífico sobre el resto de las regiones, puesto que la misma moviliza al 38,8% del total de pasajeros y concentra el 40% de los 20 aeropuertos considerados. No obstante, muy de cerca se posiciona la región norteamericana, cuyo volumen de tráfico representa el 31,8% del total de pasajeros y el 30% de los aeropuertos considerados.

En conjunto, ambas regiones se hacen del 70% de los aeropuertos y movilizan el 70% del volumen total de pasajeros. Esto corrobora la vinculación directa que existe entre la cantidad de aeropuertos y la cantidad de pasajeros transportados.

Por otra parte, se demuestra que para lograr posicionarse en el 2015 dentro de los aeropuertos con mayor tráfico de pasajeros en el mundo, resultó determinante (para los aeropuertos considerados) la realización de adecuaciones en su infraestructura, toda vez que la totalidad de los mismos llevó a cabo reformas en el periodo 2003-2015.

Sin embargo, únicamente el 50% requirió expandirse más allá del perímetro establecido en el año 2003. Dentro de estos, se observa que en el 80% de los casos los aeropuertos accionaron sobre su entorno, mientras que en el 20% restante fue el entorno el que obligó a los aeropuertos a redefinirse.

En esta línea, la región Asia-Pacífico fue la que incorporó la mayor cantidad de nueva infraestructura, acaparando el 74% del crecimiento total de superficie experimentado por los aeropuertos considerados en el periodo 2003-2015.

Por último, como se planteó anteriormente, la relación promedio de m<sup>2</sup>/pax calculada permite suministrar información preliminar de cuanta superficie es requerida para movilizar determinado

volumen de pasajeros, o recíprocamente, qué volumen de pasajeros es capaz de movilizar un aeropuerto.

## BIBLIOGRAFÍA

- Annual Traffic Data.  
<http://www.aci.aero/Data-Centre/Annual-Traffic-Data>
- Map Maker.  
<http://bighugelabs.com/map.php>
- World Map.  
[http://edit.freemap.jp/en/trial\\_version/edit/northAmerica](http://edit.freemap.jp/en/trial_version/edit/northAmerica)
- AIP de Europa.  
<http://deltafox.webs.com/aip.htm>
- Great Circle Mapper.  
<http://www.gcmap.com>
- Word Aero Data.  
<http://worldaerodata.com>

## PLATAFORMA LINEAL AEROPORTUARIA: ESTUDIO DE LA RELACIÓN DEMORA-INFRAESTRUCTURA MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

Gabriel Ramírez Díaz, Joaquín Piechocki, Alejandro Di Bernardi

Grupo Transporte Aéreo – UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: [ramirezdzg@gmail.com](mailto:ramirezdzg@gmail.com)

**Palabras claves:** *Aeropuerto, Capacidad Operacional, Indicadores de rendimiento, Infraestructura aeroportuaria, Medioambiente, Plataforma, Simulación.*

### INTRODUCCIÓN

Entre los principales aspectos sobre los cuales se enfoca la gestión del sistema aeroportuario se encuentran la capacidad operacional y el medio ambiente, los cuales históricamente, a pesar de su estrecha relación, han sido analizados a través de herramientas independientes. La bibliografía reciente reporta distintos casos en los que la capacidad del sistema, en particular el subsistema espacio aéreo, es susceptible de ser ampliada a partir de contemplar de manera integrada las dimensiones operacionales y ambientales, como es el caso del aeropuerto de Bologna[1]. Sin embargo, esta clase de estudios aún no se ha hecho extensivo a los subsistemas del área de movimientos del aeropuerto, vale decir al lado aeronáutico.

Dado que los aeropuertos son sistemas complejos en los cuales participan un número de variables significativo, es habitual que los métodos presentes en la literatura se enfoquen sobre un aspecto en particular (operacional, ambiental, económico), y se analicen en forma parcial (por ejemplo, terminal, plataforma, calle de rodaje, pista, espacio aéreo) y desintegrada (estudiando la capacidad operativa o la ambiental). En este contexto, el objetivo general al cual contribuye este estudio es al desarrollo de una herramienta metodológica para la evaluación y análisis del sistema aeroportuario, considerando simultáneamente la dimensión operacional y ambiental.

### DESARROLLO

El presente estudio consistió en tres etapas. La primera etapa incluyó el modelado del problema a través del software SIMMOD [2], el cual se utilizó para caracterizar la dimensión operacional de distintas configuraciones de plataforma (número de puestos). El software SIMMOD permitió cuantificar la demora generada (durante la franja horaria simulada) para cada subsistema, segregada en arribos y partidas. La cuantificación de la demora se realizó en base a las reglas operacionales condicionales incluidas en el modelo, las cuales especifican las acciones a ser tomadas por la simulación en base al estado del sistema.

La segunda etapa consistió en identificar las variables ambientales. La dimensión ambiental puede ser analizada a partir de diferentes variables, por ejemplo, las emisiones de las aeronaves y/o vehículos de handling durante su operación, el impacto de la construcción de la infraestructura, la generación de efluentes durante las actividades aeroportuarias, entre otros. En el presente estudio, se propuso a la superficie en plataforma como indicador del impacto ambiental, dado que el aumento de superficie en plataforma conlleva un aumento en: el impacto de las actividades de construcción, la demanda de materias primas para la



ejecución de obras, el volumen de actividades de mantenimiento, la distancia recorrida por las aeronaves, la dispersión y arrastre de efluentes en plataforma, la cantidad de vehículos de handling requeridos para las operaciones, la distancia recorrida por los vehículos, entre otros. En consecuencia, la superficie de plataforma es un indicador que admite el análisis comparativo de las distintas configuraciones de plataforma cuantificando, a partir de ella, la dimensión ambiental de modo indirecto. En el presente trabajo, aspectos como las emisiones producidas por la operación en la plataforma no fueron contempladas, dado que esto requiere caracterizar un perfil de demanda diario y anual. Dicho nivel de análisis escapó al alcance del presente trabajo. En el presente estudio se empleó el software AirportConstructionEmissionsInventoryTool (ACEIT) [3], el cual permite cuantificar las emisiones de las fuentes Nonroad, Onroad y Fugitivas generadas durante la etapa de construcción. Adicionalmente, se consideraron las emisiones asociadas a la fabricación y obtención del hormigón (principal insumo en la construcción de la plataforma), las cuales fueron estimadas a partir de factores de emisión [4, 5] basados en los lineamientos de los inventario de emisiones [6].

En la tercera etapa se integraron la dimensión operacional y ambiental, limitada a su etapa de construcción. Se las presentó en forma gráfica, y se identificaron sus relaciones. Este análisis permitió llevar a cabo el proceso de evaluación y toma de decisión en el análisis de una plataforma del tipo lineal.

### **Modelado del problema - dimensión operacional**

La información de partida utilizada en el modelo es: configuración esquemática del aeropuerto, tipos de aeronaves (categoría y modelo), programación del día de diseño, reglas operativas asociadas a los procedimientos de despegue-arribo y reglas de operación asignada al uso de la infraestructura.

En el caso del esquema del aeropuerto, dado que el objetivo del estudio fue analizar focalizadamente una plataforma del tipo lineal como un sistema dependiente de los demás componentes de la infraestructura de la parte aeronáutica, fue necesario definir un aeropuerto genérico, junto con las rutas de arribo y partida, para simular el comportamiento de la plataforma lineal incluida. La configuración de campo de vuelo adoptada, corresponde a una pista única con rodaje paralelo. El rodaje paralelo sirve de ingreso y salida a los puestos de estacionamiento. La plataforma cuenta con un único punto de arribo y un único punto de partida. Por otro lado, el espacio aéreo se encuentra conformado por una ruta de arribo, una ruta de partida, y una ruta de escape en caso de aterrizaje abortado. Los puestos de estacionamiento en plataforma se encuentran dispuestos lado a lado, siguiendo los lineamientos de diseño de la FAA [7] y OACI [8] para la configuración de puestos con solapado del área libre de objetos asumiendo como aeronave crítica el B737-800.

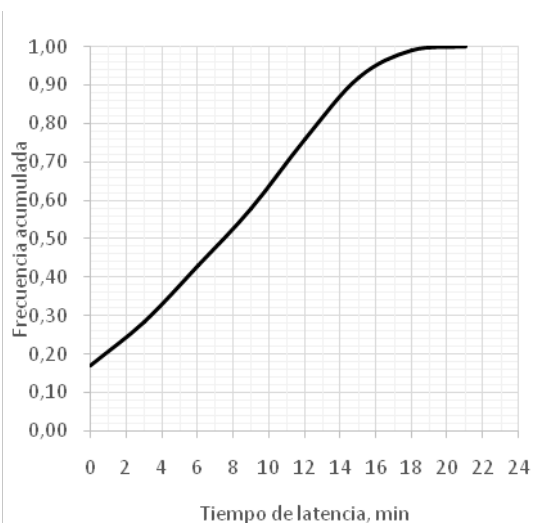
Entre las reglas operacionales incluidas en el modelo, se encuentran las que siguen: a) ninguna aeronave puede despegar o aterrizar si la pista se encuentra activa (otra aeronave está usando la pista), b) el procedimiento de remolque en salida o pushback implica el remolque de la aeronave desde el puesto de estacionamiento hasta la calle de rodaje, donde la aeronave es alineada al eje de la calle de rodaje, c) las operaciones de rodaje, ingreso y salida del puesto de estacionamiento no pueden llevarse a cabo si en el puesto adyacente se está realizando la operación de pushback. En relación a las reglas de separación entre aeronaves se definieron de modo tal que la distancia entre dos aeronaves nunca sea inferior a los 100 m, excepto para las aeronaves en los puestos de estacionamiento, donde la separación entre ellas en plataforma está determinada por las dimensiones del puesto. Las reglas de separación en aire se basan en los mínimos aceptables por los procedimientos de seguridad, asociados a la separación por estela turbulenta. En cuanto a las velocidades de rodaje se fijaron para cada tipo de calle de rodaje: 30 km/h para los rodajes entre la pista y la calle de rodaje en plataforma, 10 km/h para el rodaje en plataforma, y 5 km/h para los rodajes de acceso a puesto y pushback.

Una de las variables que influye en el desempeño de la infraestructura lado aeronáutico son las condiciones a la cual es sometida, en otras palabras, la demanda. Como consecuencia de las operaciones a las que sirve la infraestructura aeronáutica se generan demoras en su uso, e impacto ambiental (de las operaciones) proporcional a dicha demanda. En el presente estudio, la programación de los vuelos de arribo (demanda) se formuló en base a una planificación de tráfico basada en una tasa de arribos constante. La tasa de arribos correspondió a una aeronave cada 3 minutos, que equivale a una magnitud de movimientos de 40 operaciones por hora en una condición de operación estabilizada en donde la ocupación y desocupación de la plataforma opera de manera sostenida. Dicha demanda se mantuvo fija para todas las configuraciones de plataforma analizadas. En el caso del tiempo de servicio que corresponde a las plataformas este fue asignado a cada vuelo siguiendo una distribución de probabilidad cuyo valor esperado fue adoptado en 60 min.

### Definición de distribuciones de probabilidad

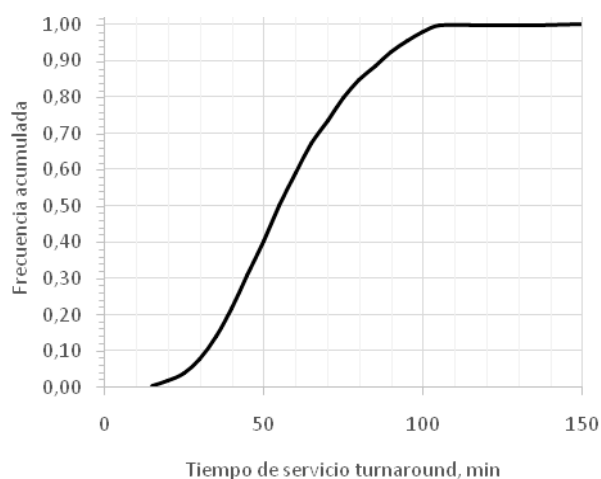
Los procesos de los sistemas de transporte aéreo están compuestos por fenómenos constituidos por cierto grado de aleatoriedad. Estos comportamientos se contemplan en el modelo a través de las distribuciones de probabilidades en tiempos de servicio y aparición de eventos discretos. En particular, las variables afectadas fueron el tiempo de retraso en arribos, servicio en plataforma, puesta en marcha de motores y posicionamiento del pushback.

Siguiendo el orden mencionado, el tiempo de retraso en arribos (retraso respecto al horario programado) es un parámetro asociado a cada vuelo. Éste desvío se puede interpretar como el conjunto de demoras generadas en procesos no modelados generadores de la dispersión y se introdujo en el modelo por medio de la distribución que se presenta en la Figura 1, la cual fue elaborada a partir del procesamiento de los datos publicados por estudios de referencia [9] donde se presenta un modelo analítico para simular la eficiencia de las operaciones turnaround en aeropuertos.



1

Figura



2

Figura

Figura 1) Distribución estadística del tiempo de latencia en arribos, 2) Distribución estadística del tiempo en plataforma

El tiempo de servicio tiene asociada la distribución de probabilidad que se muestra en la Figura 2, la cual fue creada a través del procesamiento de los datos publicados por estudios como los de [10] en su estudio sobre el análisis de los AirlineServiceQuality Performance (ASQP).

El procedimiento de pushback tiene asignada dos distribuciones de probabilidad, una asociada al procedimiento del posicionamiento y alineación de la aeronave en la calle de rodaje (Figura 3) y la otra asociada a la puesta en marcha de los motores (Figura 4). Las distribuciones fueron construidas a partir del procesamiento de los datos publicados por [11].

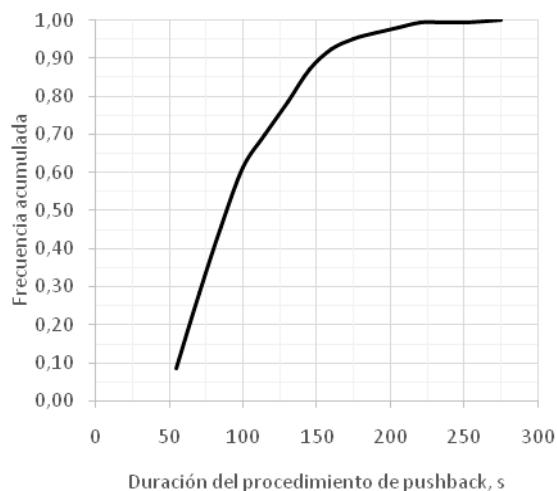


Figura 3

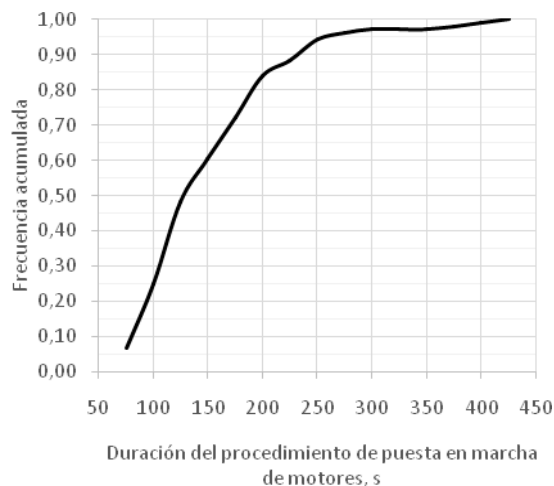


Figura 4

*Figura 3) Distribución estadística de la duración del procedimiento de pushback, 4) Distribución estadística de la duración del procedimiento de puesta en marcha de motores.*

### Calculo de la demora

Una vez definida la configuración básica del sistema, el cual contempla el esquema de aeropuerto (rutas, pistas, rodajes y puestos de estacionamiento), y las condiciones de contorno dadas por los procedimientos de uso de la infraestructura (desarrollada en base a patrones de operación representativos), las reglas de separación, las velocidades operativas, la programación de los vuelos y las distribuciones de probabilidad, se simuló el sistema obteniéndose todas las salidas brindadas por el programa SIMMOD, de las cuales se relevó en forma particular las demoras del subsistema tierra. El cálculo de las configuraciones de plataforma restantes implicó generar puestos adicionales sobre el esquema del aeropuerto, midiendo los cambios marginales producidos en el sistema al agregarlos de a uno. Estos nuevos puestos de estacionamiento contaron con condiciones de contorno idénticas a la de la configuración inicial.

### Modelado del problema - dimensión ambiental

El software ACEIT define tres niveles de análisis para el cálculo de las emisiones del proyecto. Los niveles de análisis son clasificados en función de los datos mínimos requeridos para el ejecutar el programa. En el nivel 1 se requiere la información básica del proyecto: nombre del proyecto, duración de la obra, condiciones climáticas, actividades incluidas en la obra, costo y dimensión de la misma. En cuanto los rendimientos de la mano de obra, equipamiento y materiales, se obtiene a través de factores estándar configurados por defecto en el programa. En este nivel las emisiones se limitan a las fuentes Onroad (vehículos carreteros) y Nonroad (vehículos no carreteros), en el nivel 2 es posible modificar los datos de actividad y rendimientos y en el nivel 3 se definen parámetros adicionales con el objetivo de contabilizar las emisiones fugitivas.

Dado que el presente estudio corresponde a un aeropuerto genérico, se optó por realizar un análisis de Nivel 1, el cual requirió definir dos grupos de entradas: por un lado, las que se conservan fijas independientemente de la configuración de plataforma y, por el otro, aquellas que depende de la configuración de plataforma.

Las entradas independientes de la configuración de plataforma incluyen como supuesto la duración de la obra, temporada de construcción, condiciones climáticas, actividades y equipamiento empleado, las cuales se encuentran definidas a continuación.

Las entradas dependientes del tipo de configuración como *dimensión de plataforma* y *costo del proyecto*, fueron variables definidas para cada tipo de configuración. En el caso de la variable *dimensión de plataforma*, se adoptó una relación lineal dada por:  $y = 1600 n$ , donde  $y$  es la superficie de plataforma a construir y está dada en  $m^2$ , y  $n$  es el número de puestos en plataforma. En el caso de la variable *costo del proyecto*, se cuantificó a través de la expresión  $z = -0.0125 n^2 + 1.875 n + 2.5$ , donde  $z$  es el costo del proyecto expresado en millones de U\$D,  $yn$  es el número de puestos en plataforma.

En relación al cálculo de las emisiones equivalentes del proceso de fabricación de materias primas se consideraron las emisiones asociadas al hormigón, basándose en los lineamientos presentados [6]. Para ello se empleó el factor de emisión publicado [5] correspondiente al hormigón tradicional, el cual equivale a 519 kg CO<sub>2</sub> emitido por m<sup>3</sup> de hormigón. El cálculo del volumen de hormigón se basó en la expresión  $V = e y$ , donde  $y$  es la superficie de plataforma en  $m^2$ , y  $e$  es el espesor del hormigón de la plataforma, el cual fue considerado igual a 0,35 m.

En relación a las emisiones equivalentes globales, la construcción de una plataforma de estacionamiento de aeronaves supone la incorporación de un sistema de infraestructuras mucho más complejo al modelado, en donde sería menester considerar el ciclo de vida de cada elemento conjuntamente con las operaciones que posibilita. El modelo previsto incorpora una evaluación de primer orden asociado a su construcción, que es proporcional al número de puestos, y entonces a los metros cuadrados incorporados. En el caso de considerarse la operación de los vehículos de handling, se prevé que el nivel de emisiones aumente, conservando también un comportamiento lineal. En el caso de considerar la operación de las aeronaves se prevé que, si bien las emisiones totales presentarían un aumento, el comportamiento de la curva será dependiente de la demora en la utilización de la infraestructura, mostrando mínimos para demoras bajo el nivel de servicio límite propuesto (4 minutos). Por otro lado, las emisiones globales de la construcción de la plataforma deberían prorratearse en la vida útil de la infraestructura, que tendrá un límite temporal y un límite en cantidad de operaciones. Esta medida permitirá establecer el aporte contaminante de cada operación en plataforma.

## RESULTADOS

La simulación de los diferentes escenarios permitió medir la demora en cada uno de los subsistemas del aeropuerto para el propósito de este estudio. Los índices de interés fueron las demoras en tierra (dimensión operacional) y las emisiones asociadas al desarrollo de plataforma (dimensión ambiental, limitada en este caso al impacto de la construcción). En la Figura 5 se presenta el aumento de las emisiones de dióxido de carbono equivalentes a la construcción de la superficie de plataforma, mostrando un aumento lineal de este efluente equivalente con la cantidad de puestos. En la Figura 6 se presentan la demora por operación que se registra para tres intensidades diferentes de demanda (a la cual es sometido el sistema de plataforma lineal) a medida que aumenta la disponibilidad de puestos de estacionamiento. La denominada Intensidad I corresponde a una demanda de aeronaves entrantes a la plataforma cada 3 minutos, la Intensidad de demanda II corresponde a 2,5 minutos y la intensidad de demanda III corresponde a 2 minutos de separación. En la generación de la demora concurren la asociación entre calle de rodaje, puestos de estacionamiento y procedimientos aplicados.

La relación observada entre los indicadores de demora y emisiones (Figura 5 y 6), sugiere que, para una determinada demanda, las soluciones de compromiso que contemplan la dimensión ambiental serán aquellas que limiten la ampliación de la plataforma en función de

la elasticidad de la demora. Será conveniente entonces limitar la intensidad de la demanda de la plataforma para alcanzar los niveles de servicio buscados. Estas dos conclusiones indican que 30 puestos de estacionamiento por módulo de plataforma lineal, compuesto por calle de entrada, plataforma, rodaje en plataforma y calle de salida, es un límite práctico para no degradar la eficiencia ambiental de la plataforma. Se puede observar cómo a partir de esta magnitud se manifiestan fenómenos agregados que generan demora que hacen caer abruptamente la elasticidad de la demora con la disponibilidad de puestos de estacionamiento.

Es posible observar que, a partir de determinado nivel de disponibilidad de infraestructura, la incorporación de una mayor capacidad en puestos de estacionamiento no genera una mejora sustancial en la demora, mientras que la generación de impacto ambiental sigue siendo proporcional. De igual modo, es posible observar que existe un patrón de comportamiento de la demora que genera el sistema para distintos niveles de demanda que indica que la mejora en la demora inducida que supone la incorporación de un nuevo puesto de estacionamiento, mejora marginal de la demora, pierde efectividad a partir de un nivel dado de puestos.

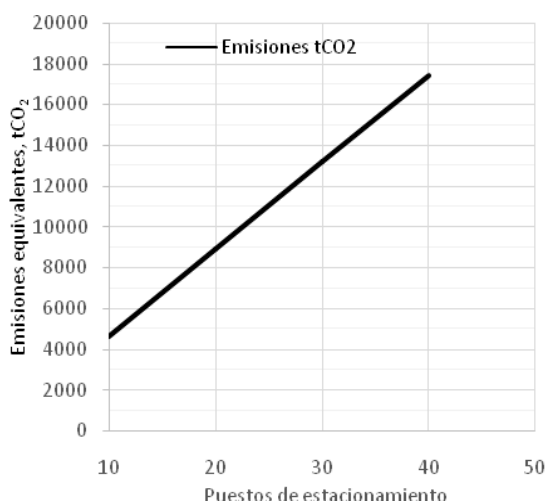


Figura 5

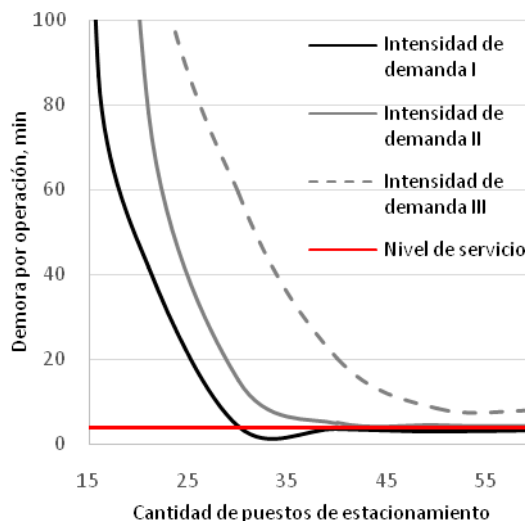


Figura 6

*Figura 5) Relación entre el crecimiento de la plataforma y la emisión global de CO<sub>2</sub>e (Relación entre cantidad de puesto de la plataforma y la demora promedio por aeronave para distintos niveles de intensidad de demanda, para un nivel de servicio objetivo de 4 minutos de demora*

## CONCLUSIONES

Se puede concluir que, para cada patrón de demanda y configuración de plataforma, existe un límite de ampliación de puestos de estacionamiento. En particular es la dimensión ambiental la que inviabiliza el incorporar capacidad marginal a la plataforma. Vale decir que se evidencia la existencia de límites de ampliación para cada tipología de infraestructura de plataforma dependiente de su equilibrio implícito funcional (relación rodajes y puestos de estacionamiento) y la dimensión ambiental. El funcionamiento del sistema de distribución de demanda, el rodaje de plataforma, introduce límites en la posibilidad de establecer canales de servicio, vale decir puestos de estacionamiento. La Figura 6 indica que es posible establecer un límite del orden de 30 puestos de estacionamientos bajo una misma calle de rodaje, puesto que el impacto ambiental mantiene su proporcionalidad con la superficie incorporada, pero la capacidad de reducir la demora frente a distintas condiciones de demanda pierde efectividad. Es necesario explorar un conjunto de condiciones de demanda

y operación más amplia para determinar regularidades de este comportamiento, como también de comportamiento ambiental de las infraestructuras.

El análisis de los resultados permitió concluir que es posible encontrar un punto de diseño donde la dimensión ambiental y operacional se integren obteniéndose valores equilibrados de desempeño. Este punto de diseño presenta una fuerte dependencia de las características operacionales, dado que es susceptible a la distribución de los tiempos de servicio, retrasos generados en procesos previos al arribo, puesta en marcha de motores y procedimiento de pushback. Es posible establecer una metodología general de integración de variables operacionales y ambientales en torno al concepto de capacidad operativa, para evaluar la infraestructura aeroportuaria en general. El presente estudio representa un caso específico de ese cuerpo metodológico.

## REFERENCIAS

- [1] N. Gualandi, L. Mantecchini, and D. Serrau, "Environmental Capacity and Sustainability of European Regional Airports: A Case Study," *Conf. World Acad. Sci. Technol.*, vol. 2, pp. 783–788, 2008.
- [2] FAA, "Simmod Manual: How SIMMOD Works," pp. 1–79.
- [3] T. R. Board, "ACRP REPORT 102 Guidance for Estimating Airport Construction Emissions," 2013.
- [4] Asociación de Fabricantes de Cemento Portland, "Informe de Sostenibilidad 2011," 2011.
- [5] I. C. Brunatti, "Hormigón y Pavimentos Consideraciones generales," 2013.
- [6] EMEP and EEA, "Air pollutant emission inventory guidebook 2016," 2016.
- [7] Federal Aviation Administration (FAA), "Advisory Circular: AC 150/5300-13A: Airport Design," 2014.
- [8] International Civil Aviation Organization (ICAO), *Anexo 14*. 2009.
- [9] C.-L. Wu and R. E. Caves, "Modelling and optimization of aircraft turnaround time at an airport," *Transp. Plan. Technol.*, vol. 27, pp. 47–66, 2004.
- [10] L. Schaefer and T. Noam, "Aircraft Turnaround Times for Air Traffic Simulation Analyses," *Transp. Res. Board*, 2003.
- [11] W. J. Coupe, D. Milutinovi, W. Malik, and Y. Jung, "A Data Driven Approach for Characterization of Ramp Area Push Back and Ramp-Taxi Processes," *AIAA Aviat. Technol. Integr. Oper. Conf.*, no. June, pp. 1–15, 2016.



## CAPACIDAD AEROPORTUARIA: ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES ALEATORIAS SOBRE EL LADO AIRE MEDIANTE EL USO DE SIMULACIONES COMPUTACIONALES

Gabriel Ramírez Díaz, Joaquín Piechocki, Alejandro Di Bernardi

Grupo Transporte Aéreo – UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: [ramirezdiaz.gabriel@gmail.com](mailto:ramirezdiaz.gabriel@gmail.com)

**Palabras claves:** *Aeropuerto, Capacidad operacional, Estadística y probabilidad, Gestión de operaciones, Simulación.*

### INTRODUCCIÓN

La capacidad del sistema aeroportuario representa un parámetro de primer orden si se aborda su planificación y/o su gestión. La capacidad puede ser calculada a través de herramientas de base empírica, analíticas y de simulación, las cuales arrojan distintos niveles de detalle en relación a la caracterización de la infraestructura y los procesos que en ella se llevan a cabo. Una de las principales diferencias que existe entre las herramientas anteriormente nombradas, es el cómo se consideran los efectos aleatorios de cada uno de los procesos del sistema.

Si bien es conocido que la capacidad de los sistemas es sensible a la duración de los procesos que lo componen y a los desvíos respecto de los horarios y tiempos estimados de servicio, el impacto de las variables aleatorias en la cuantificación de la capacidad es motivo de especial interés científico y de gestión.

El presente estudio se basó en la utilización de la herramienta de simulación “Airport and AirspaceSimulationModel” (SIMMOD) con el fin de caracterizar la influencia de las variables como el tiempo de retraso en arribos, el tiempo de servicio en plataforma, la duración del proceso de remolque de salida (pushback) y puesta en marcha, sobre las operaciones de arribo, turnaround y partida.

Para el desarrollo de este trabajo, el estudio se estructuró en cinco etapas. La primera etapa consistió en adoptar modelos representativos de distribución asociada a cada uno de los procesos previamente nombrados. La segunda se abocó a la construcción del modelo del sistema aeroportuario mediante la herramienta SIMMOD[1]. En la tercera etapa se simuló el sistema considerando las distribuciones de las variables aleatorias del proceso. En la cuarta etapa se estudió la respuesta del sistema frente a la variación de los parámetros (media, mediana y varianza) de las distribuciones. En la quinta y última etapa se cuantificó el impacto y sensibilidad del sistema.

### DESARROLLO

#### Definición de distribuciones de probabilidad

Los procesos asociados a las operaciones de arribo, turnaround y partida, fueron caracterizados a partir de distribuciones representativas de casos particulares relevadas a partir de la literatura disponible. Para cada una las distribuciones obtenidas, se identificaron

los parámetros de valor medio y mediana, los cuales fueron empleados posteriormente en la simulación de los procesos.

Los procesos caracterizados a través de las distribuciones fueron: la latencia en arribos, el tiempo de servicio en plataforma, el tiempo de pushback y puesta en marcha.

La latencia (retraso respecto al horario programado se puede interpretar como el conjunto de demoras generadas en procesos no modelados, generadores de la dispersión en el horario de arribo de aeronaves. Este parámetro se introdujo en el modelo por medio de la distribución que se presenta en la Figura 1, la cual fue elaborada a partir del procesamiento de los datos publicados por estudios de referencia [2] donde se presenta un modelo analítico para simular la eficiencia de las operaciones turnaround en aeropuertos.

El tiempo de servicio tiene asociada la distribución N° 1 de probabilidad que se muestra en la Figura 2, la cual fue creada a través del procesamiento de los datos publicados[3] sobre el análisis de los AirlineServiceQuality Performance (ASQP). La distribución de probabilidad adoptada corresponde a una aeronave categoría Large (como es una aeronave B737-800) bajo la clasificación FAA. En el caso de la distribución N° 2 se planteó un tiempo mínimo de servicio coincidente con la mediana de la distribución N° 1, considerándose de este modo, a la distribución N° 2 como una representación más habitual en el contexto nacional, en donde no se solicita abandonar las posiciones de estacionamiento de manera anticipada.

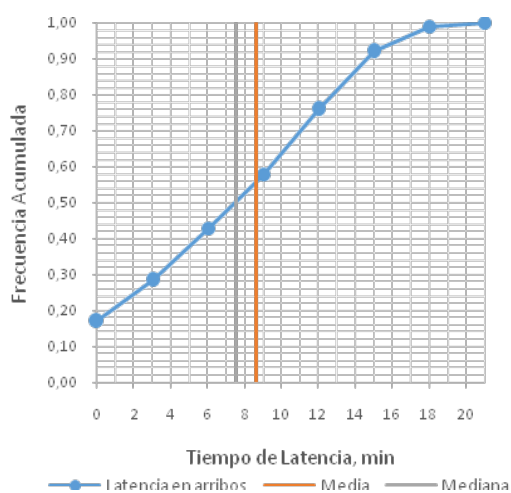


Figura 1

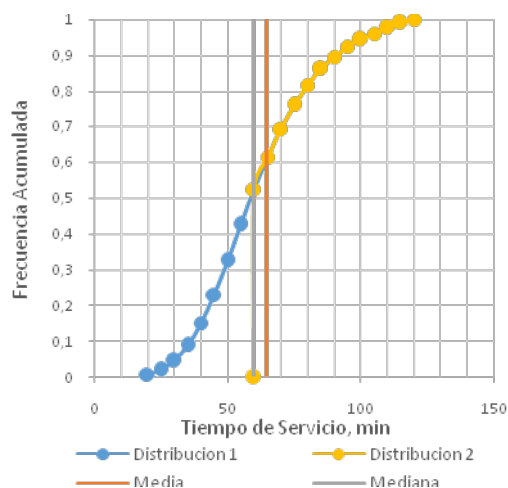


Figura 2

Figura 1) Distribución estadística del tiempo de latencia en arribos, 2) Distribuciones estadísticas del tiempo en plataforma.

Al procedimiento de pushback se le asignan dos distribuciones de probabilidad, una asociada al procedimiento del posicionamiento y alineación de la aeronave en la calle de rodaje (Figura 3) y la otra asociada al tiempo de permanencia (posterior al remolque) de la aeronave sobre el eje de la calle de rodaje (Figura 4). Durante este tiempo de permanencia se genera la liberación del tren delantero de la aeronave y puesta en marcha de la misma. Las distribuciones de la Figura 3 y la Figura 4 fueron construidas a partir del procesamiento de los datos publicados [4], en donde se presentan los tiempos de duración de los diferentes procesos llevados a cabo en el aeropuerto de Charlotte Douglas (CLT).

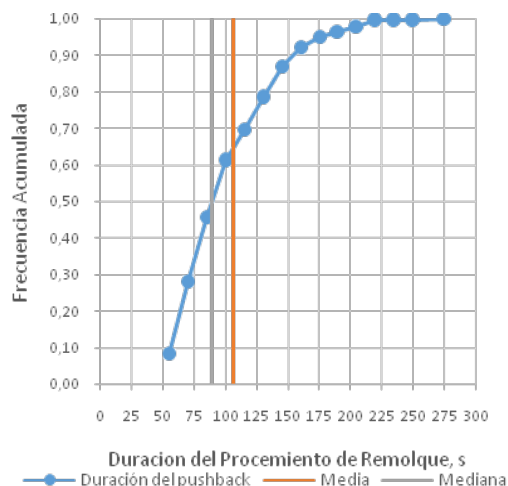


Figura 3

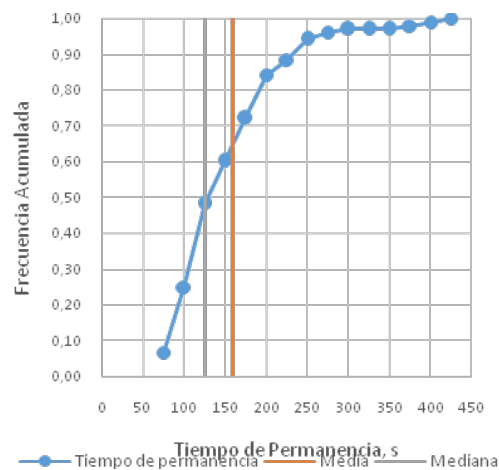


Figura 4

Figura 3) Distribución estadística de la duración del procedimiento de pushback, 4) Distribución estadística del tiempo de permanencia y puesta en marcha posterior al pushback.

### Modelos de simulación del sistema aeroportuario

Los modelos de simulación consisten en aeropuertos de pista única y rodaje paralelo en toda su extensión dotados de una plataforma lineal con distintas cantidades de puestos de estacionamiento (16, 20, 30, 40, 50 y 60 puestos). El módulo de plataforma, en todos los casos, fue configurado con un rodaje de ingreso y a un rodaje de salida de plataforma, los cuales son paralelos a la pista considerada en el sistema bajo análisis.

El modelo de simulación incluye, en su definición, la configuración esquemática del aeropuerto (respetando los criterios de diseño de ICAO [5] y la FAA [6], los tipos de aeronaves (categoría y modelo, que en el caso bajo análisis se consideró al B737-800), programación del día de diseño (que en el caso bajo análisis se consideró como demanda constante, con una tasa de arribo de una aeronave cada 3 minutos durante un franja de 5 horas), reglas operativas asociadas a los procedimientos de despegue-arribo y reglas de operación asignada al uso de la infraestructura (separaciones por estela turbulenta, velocidades de rodaje, entre otras, respetando estándares de seguridad).

### Simulaciones

Los módulos de plataforma construidos fueron simulados en distintos escenarios. Cada escenario se encuentra definido según la caracterización de la latencia, el tiempo de servicio, el proceso de remolque, y el tiempo de permanencia sobre la calle de rodaje como parte del proceso del pushback. La Tabla 1 indica cómo fueron construidos dichos escenarios. En esta tabla se simboliza con  $x$  los casos en donde el procedimiento adoptó como tiempo de servicio el valor medio de la distribución asociada al procedimiento.  $Me$  indica que este valor se correspondió con la mediana de las distribuciones asociadas, mientras que  $fdp$  indica que los tiempos de servicio se distribuyeron de acuerdo a las distribuciones de probabilidad presentadas en Figuras 1 a 4. De este modo, se generaron 14 escenarios para cada configuración de puestos de estacionamiento (16, 20, 30, 40, 50 y 60 puestos), dando lugar a un total de 84 casos.

Para cada uno de los escenarios se realizaron 20 iteraciones, a partir de las cuales se obtuvieron los valores promedios de demoras asociadas a los segmentos de ruta en arribo, rodaje de ingreso, posición de estacionamiento, rodaje de partida, cola de partida y ruta en partida. Si bien los resultados fueron obtenidos para cada segmento operativo, en el

presente informe se encuentran presentados en: demoras en arribos, demoras en partida y demoras totales.

Escenario	Latencia	Tiempo de servicio	Tiempo de servicio	Remolque	Permanencia
		Distribución 1	Distribución 2		
1	$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$
2	<i>fdp</i>	$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$
3	$\bar{x}$	<i>fdp</i>	<i>nc</i>	$\bar{x}$	$\bar{x}$
4	$\bar{x}$	<i>nc</i>	<i>fdp</i>	$\bar{x}$	$\bar{x}$
5	$\bar{x}$	$\bar{x}$	$\bar{x}$	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>
6	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>	<i>nc</i>	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>
7	<i>fdp</i>	<i>nc</i>	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>
8	<i>Me</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>
9	<i>fdp</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>
10	<i>Me</i>	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>
11	<i>Me</i>	<i>nc</i>	<i>fdp</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>
12	<i>Me</i>	<i>Me</i>	<i>Me</i>	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>
13	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>	<i>nc</i>	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>
14	<i>fdp</i>	<i>nc</i>	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>	<i>fdp</i>

Tabla 1 Escenarios de análisis, donde *fdp* indica que se aplicó una distribución de probabilidad al considerar los tiempos del procedimiento,  $\bar{x}$  indica que se consideró su valor medio *Me* su mediana. *nc* indica que no corresponde.

## RESULTADOS

En las Figuras 5, 6, 7 y 8 se presentan los resultados obtenidos para los escenarios 8 a 14, los cuales corresponden a la combinación del parámetro Mediana (*Me*) y las distribuciones de probabilidad, tal y como se detalla en la Tabla 1.

El escenario 8 (el cual no considera ninguna distribución y en su lugar emplea como parámetro la Mediana) se toma como punto de referencia para los escenarios 9 a 14 (escenarios que combinan la Mediana y la función de distribución de probabilidad).

En las Figuras 5, y 7 se puede observar el comportamiento de los niveles de demora en arribos y totales, para la tipología de plataforma estudiada y bajo la condición de demanda impuesta. En dichas figuras, se puede verificar la relación entre capacidad y demanda, la cual indica que, para una determinada capacidad, los niveles de demora aumentan exponencialmente a medida que se incrementa la demanda. La Figura 5 evidencia dos zonas. La primera zona presenta demoras netas que resultan inviables de afrontar en la práctica. El límite de la primera zona indica el punto a partir del cual la capacidad comienza a presentar un balance con la demanda, cuya frontera se encuentra entorno a los 30 puestos. En la zona 2, es en la que corresponde realizar el análisis del sistema ya que es donde los niveles de demora resultan viables de afrontar en la práctica.

En las Figuras 7 y 8, se observan los resultados de la demora total. En el caso de estudio, a partir de los 50 puestos de estacionamiento los niveles de demora presentan un comportamiento asintótico en distintos escenarios (con un leve aumento en la demora, para el caso en que se contempla la distribución del procedimiento de pushback, escenario 12 y 14). Frente a este comportamiento se puede inferir que, bajo las condiciones de análisis, la generación de puestos adicionales, más allá de los 50 puestos, no repercute significativamente en la reducción de la demora.

En relación a las configuraciones con más de 50 puestos, en los escenarios 12 y 14 puede evidenciarse un aumento en la demora, a pesar de disponer un mayor número de puestos de estacionamiento. Este comportamiento tiene su causa en que las aeronaves demoran un mayor tiempo para llegar a la cola de partida (procedimiento de partida), ya que las probabilidades de encuentro entre las aeronaves en el rodaje y aquellas que se encuentran realizando el procedimiento de pushback aumenta, generando en consecuencia más conflictos operativos que redundan en bloqueos. Este tipo de conflicto se ve potenciado por el aumento de la longitud del rodaje en plataforma sobre el cual la velocidad es menor por procedimientos de seguridad operacional.

Entre los 30 y los 50 puestos de estacionamiento, las reducciones netas de demora varían desde 7.8 y 11.6 min (en la configuración de 30 puestos) hasta 5.6 y 8 min (en la configuración de 50 puestos) según el escenario y las condiciones de estudio. El proceso de diseño de los subsistemas requiere definir el nivel de servicio deseado. Si consideramos la recomendación de la FAA que propone un nivel de servicio 4 minutos de demora por movimiento, entonces se podrá tolerar 8 minutos netos de demora total por operación (un movimiento de arribo y un movimiento de partida), tal como se evidencia en la Figura 8.

En las Figuras 5, 8, 9, 10 y 11 se observa que, excepto en el escenario 9 para las configuraciones de bajo número de puestos de estacionamiento, siempre que se consideraron las distribuciones de probabilidad, se presentaron mayores niveles de demora que en el escenario base, de igual modo cuanto mayor es el grado de aleatoriedad introducido (escenario 13 y 14), mayor es el nivel de demora.

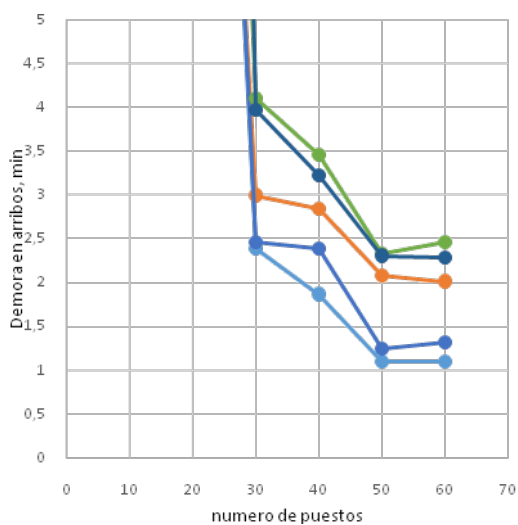


Figura 5

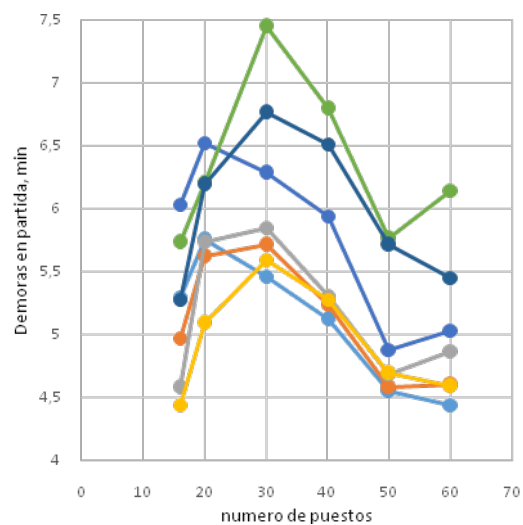


Figura 6

Escenario 8   Escenario 9   Escenario 10   Escenario 11   Escenario 12   Escenario 13   Escenario 14

En las Figuras 9, 10 y 11 se cuantifica en forma porcentual (en el eje de ordenadas) el aumento (valores mayores a 0) o reducción (valores menores a 0) del nivel de demora en arribos, partidas y demora total respectivamente, para los escenarios 9 a 14 con respecto al escenario 8, para cada una de las configuraciones de puestos de estacionamiento (eje de abscisas).

Al considerar aisladamente la latencia (escenario 9) se presentan en las configuraciones con bajo número de puestos de estacionamiento, un nivel de demora ligeramente menor (Figura 9, 10 y 11) que en el caso base. En primera instancia se presupone que la latencia introduce una condición de demanda sobre los sistemas de baja capacidad (bajo número de puestos de estacionamiento) que permite amortiguar la llegada de aeronaves y disminuir la demora total, condición que para una llegada constante puede generar que algunas aeronaves

presenten demoras excesivas por tener que esperar ciclos completos para la liberación de puestos en plataforma.

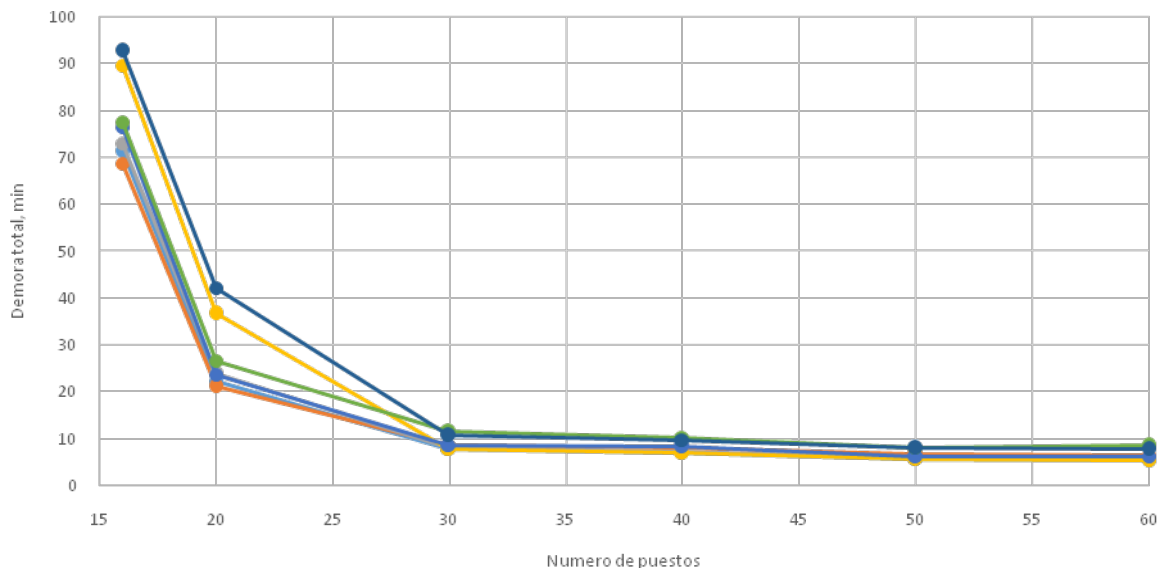


Figura 7

En el escenario 10 (tiempo de servicio entre 30 y 120 minutos) se presenta (tal como era de esperarse, por el grado de aleatoriedad introducido en la simulación) un aumento en las demoras totales (Figura 11), para todas las configuraciones.

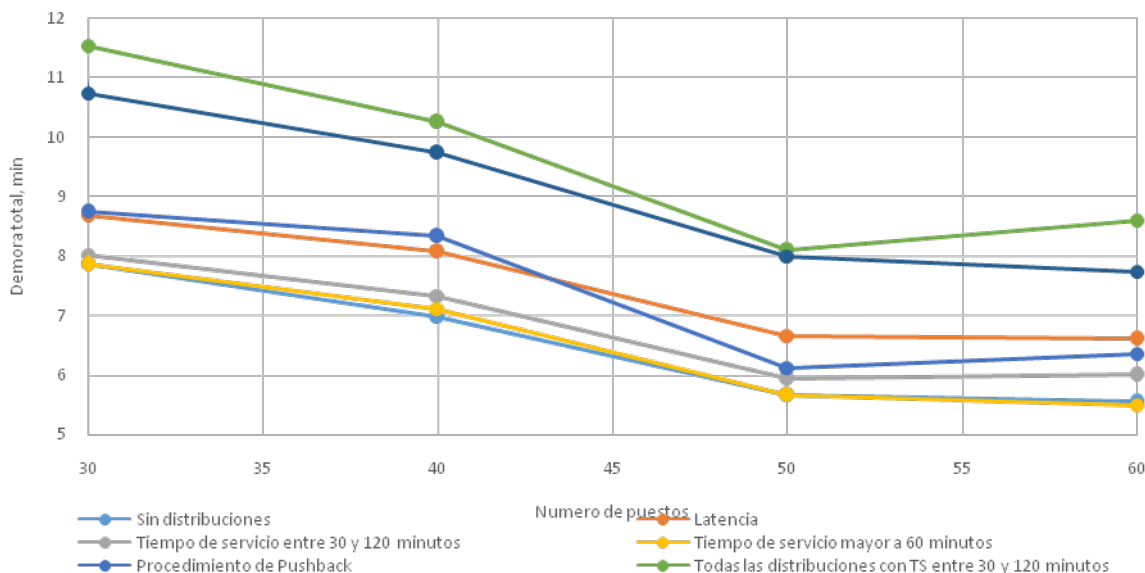


Figura 8

En el escenario 11 (tiempo de servicio mayor a 60 minutos), el cual presenta una distribución que demanda un mayor uso de la infraestructura, se presenta un aumento considerable en la demora para las configuraciones con bajo número de puestos de estacionamiento. Para las configuraciones con un elevado número de puestos (más de 30 puestos) el impacto generado es mínimo.

En el escenario 12 (el cual considera la aleatoriedad del procedimiento de pushback) se puede observar (Figura 9, 10y 11) un aumento en los niveles de demora, los cuales



repercuten principalmente en los vuelos de partida (que son quienes realizan el procedimiento de pushback) y en menor medida en las aeronaves que arriban (las cuales, a pesar de que pueden ser reasignadas a otros puestos de estacionamientos cuando estos se encuentran disponibles, hayan obstáculos durante su rodaje en plataforma).

En el escenario 13 (el cual considera la totalidad de las distribuciones) puede observarse que en todos los casos se genera un aumento en los niveles de demora, tanto en arribos como partidas, y por ende en demoras totales. El nivel de demora que se observa si bien es del orden de la superposición de las demoras introducidas por cada escenario (escenario 9, 10 y 12), se presenta como ligeramente superior.

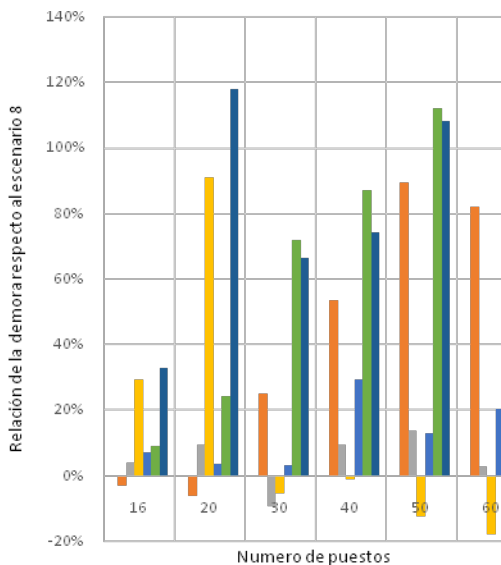


Figura 9

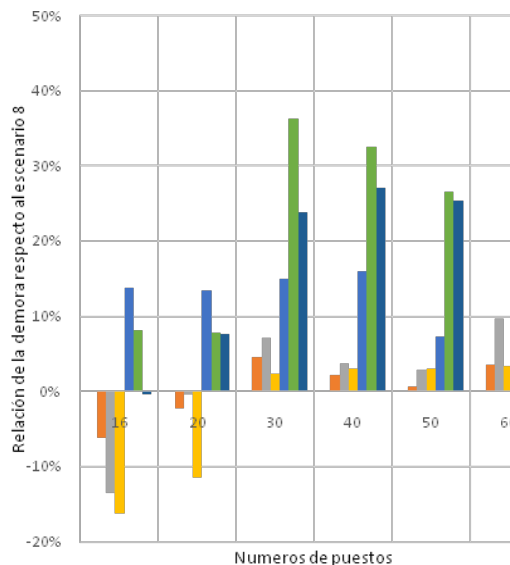


Figura 10

Escenario 8    Escenario 9    Escenario 10    Escenario 11    Escenario 12    Escenario 13    Escenario 14

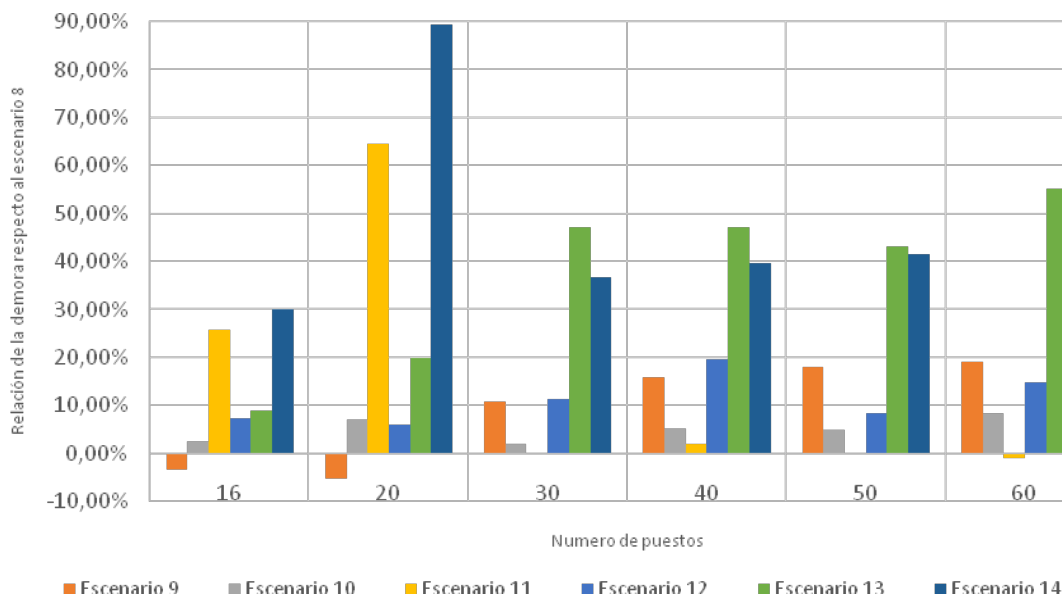


Figura 11

De forma análoga a los escenarios 8 a 14, se cuantifico la demora para los escenarios 1 a 7. El Escenario 1, que considera tiempos fijados en la media de las distribuciones, fue considerado como base.

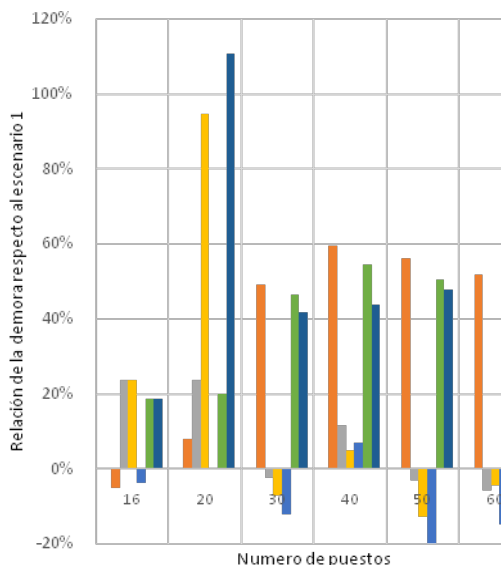


Figura 12

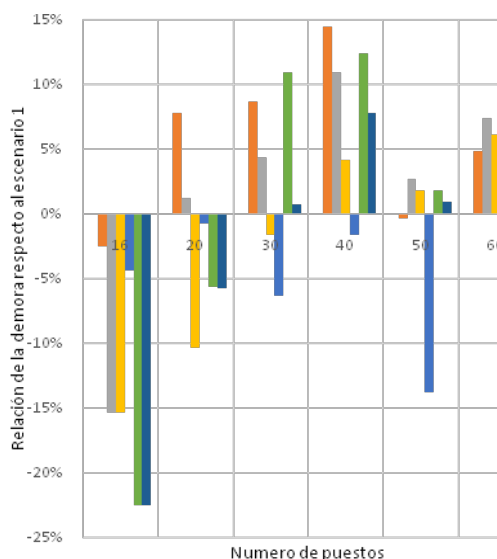


Figura 13

Escenario 1   Escenario 2   Escenario 3   Escenario 4   Escenario 5   Escenario 6   Escenario 7

## CONCLUSIONES

La consideración de las distribuciones de probabilidad en forma conjunta (escenarios 13 y 14) repercute en un aumento en los valores netos de demora total, entre un 8% y un 90% respecto del escenario 8 (sin distribución de probabilidad, basado en el parámetro de la Mediana) según el número de puestos totales en plataforma. Con un aumento promedio del 44% del nivel de demora respecto del escenario base.

El aumento en la demora se presenta incluso en aquellas condiciones en las que las distribuciones empleadas presuponen un menor uso de la infraestructura, tal como ocurre con el escenario 3, 6, 10 y 13 donde los tiempos de servicio pueden tomar valores entre 30 y 120 min.

Al considerar las distribuciones asociadas al pushback (escenario 12) se genera un aumento en los niveles de demora en todos los módulos de plataforma, siendo la demora total generada casi constante. Sin embargo, se pueden observar que, para los módulos con menor número de puestos de estacionamiento, las demoras se generan principalmente en el arribo, mientras que, para los módulos con mayor número de puestos, las demoras se generan principalmente en las partidas.

El proceso diseño de los subsistemas, que requiere definir el nivel de servicio deseado, el punto diseño para que satisfice el nivel de servicio objetivo, se ve fuertemente influenciado por las consideraciones realizadas (selección y/o caracterización del escenario de simulación).

Las demoras que se observan al considerar los procedimientos en forma conjunta, como lo fue en el caso de los escenarios 13 y 14, son proporcionales a las demoras que se presentaron al analizar las distribuciones por separado (escenario 9, 10, 11 y 12).

#### REFERENCIAS

- [1] FAA, "Simmod Manual: How SIMMOD Works," pp. 1–79.
- [2] C.-L. Wu and R. E. Caves, "Modelling and optimization of aircraft turnaround time at an airport," *Transp. Plan. Technol.*, vol. 27, pp. 47–66, 2004.
- [3] L. Schaefer and T. Noam, "Aircraft Turnaround Times for Air Traffic Simulation Analyses," *Transp. Res. Board*, 2003.
- [4] W. J. Coupe, D. Milutinovi, W. Malik, and Y. Jung, "A Data Driven Approach for Characterization of Ramp Area Push Back and Ramp-Taxi Processes," *AIAA Aviat. Technol. Integr. Oper. Conf.*, no. June, pp. 1–15, 2016.
- [5] International Civil Aviation Organization (ICAO), *Annex 14, Volume I: Aerodrome Design and Operations*, vol. I, no. July. 2016, p. 349.
- [6] Federal Aviation Administration (FAA), "Advisory Circular: AC 150/5300-13A: Airport Design," 2014.

## ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE ACCIDENTES AÉREOS EN LA REGIÓN SUDAMÉRICA

Esteban Maddonni Brito, Matías Scandura, Cristian Pardo, Federico Attademo, Matías Rodríguez, José Jácome Jácome, Lorena Castro, Alejandro Di Bernardi

Grupo Transporte Aéreo – UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico [esmabri@gmail.com](mailto:esmabri@gmail.com)

**Palabras Claves:** *Accidentes Aéreos, Región SAM, Categorías de Sucesos CICTT, Factores Contribuyentes, Aviación Comercial, Aviación General.*

### INTRODUCCIÓN

A lo largo de las últimas décadas, la demanda en la actividad aeronáutica ha ido incrementando. El número total de operaciones, horas voladas y aeronaves en servicio está en continuo crecimiento, y las distintas regulaciones que velan por la seguridad operacional se fortalecen, tornándose más rigurosas. Con ello, avances tecnológicos en los sistemas de la aeronave, mejoras en los procedimientos empleados por la tripulación o normativas más estrictas, han resultado en una continua disminución de los accidentes aéreos de la que es vastamente considerada como la forma más segura de viajar. Aun así, los accidentes seguirán ocurriendo y demandarán constantemente análisis e investigaciones asociadas para continuar minimizándolos.

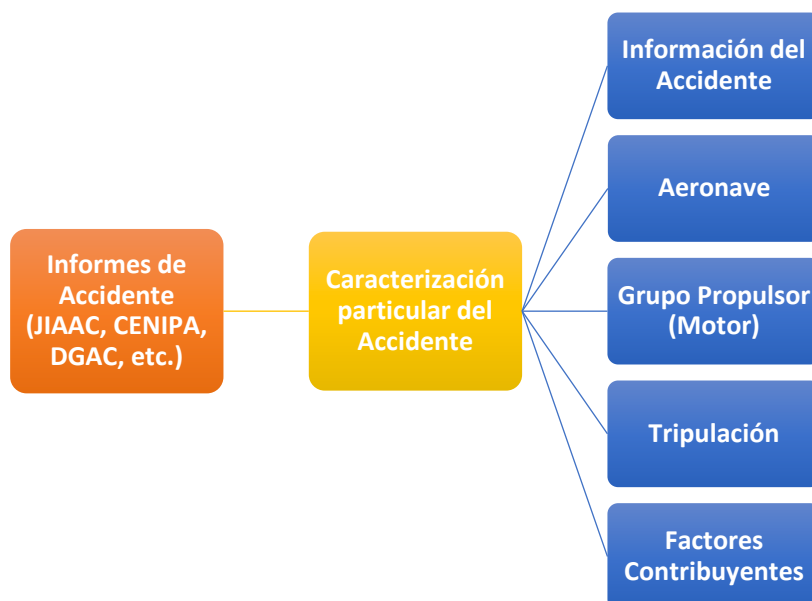
Los accidentes aéreos deben ser estudiados para determinar aquellas causas probables y factores contribuyentes, de forma tal de emitir recomendaciones de seguridad operacional cuyo único objetivo es el de prevenir futuros siniestros. Por su parte, el análisis estadístico de los mismos y todas las variables implicadas en ellos supone otra herramienta importante, permitiendo evaluar y determinar indicadores de recurrencia.

El presente estudio pretende analizar accidentes e incidentes graves, según la definición establecida por el Anexo de 13 de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), ocurridos tanto en la aviación general como la comercial, haciendo especial hincapié en las causas y factores contribuyentes que derivan en los mismos. Los sucesos a estudiar se encuentran englobados dentro de la región de Sudamérica (SAM, según OACI), excluyendo a los países de Guyana, Guyana Francesa, Panamá, Paraguay y Surinam, y que estén comprendidos dentro del período 2004-2013 inclusive.

### DESARROLLO

Toda la información necesaria para la realización de este estudio se extrae de los informes de accidente realizados por los organismos responsables de llevar adelante la investigación del mismo. A partir de dichos informes, se estudiarán uno a uno cada accidente en particular, determinando y analizando diversos aspectos de los mismos.

Partiendo del informe del accidente, se busca caracterizar a cada uno de ellos en cinco grandes grupos: Información del Accidente, Aeronave, Grupo Propulsor, Tripulación y Factores Contribuyentes.



*Metodología empleada en el informe para la caracterización de los accidentes.*

Cada uno de estos grupos incluye información fáctica del accidente, necesaria para la construcción de índices e indicadores y que permitirán identificar aquellos problemas latentes en la actividad aeronáutica de la región. Nótese que dependiendo del país que investigue el suceso, algunas variables pueden no estar disponibles en el informe de accidente y, por ende, no son recopiladas.

Entre toda la información recopilada, se hará especial hincapié en las causas o factores contribuyentes al accidente. Dichos factores se agrupan en cuatro categorías distintas:

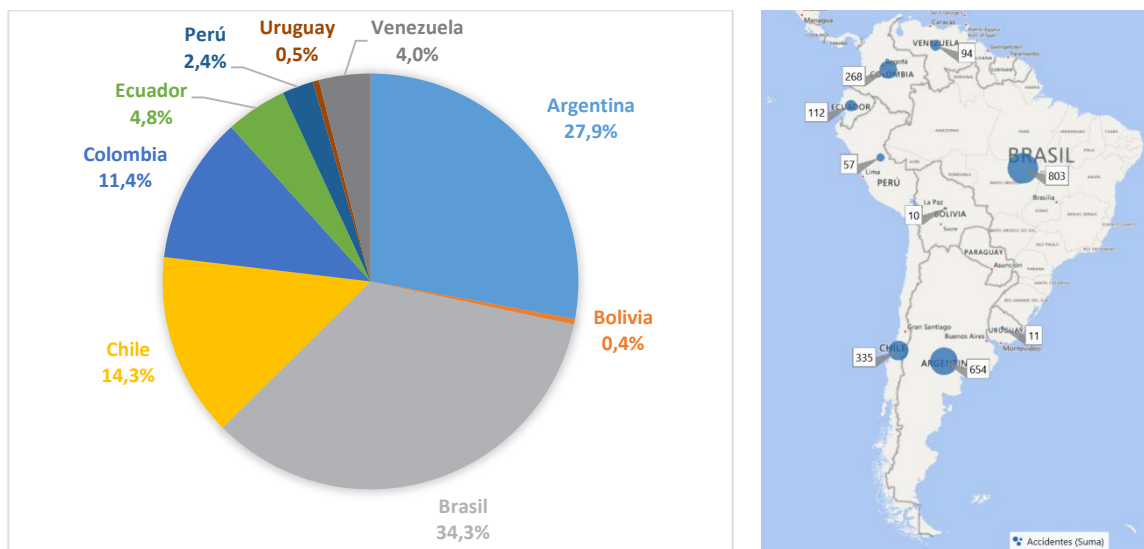
1. **Meteorología:** Todo aquel factor que se atribuya a las condiciones climatológicas reinantes durante el vuelo y que contribuyese activamente a la ocurrencia del siniestro.
2. **Factores Humanos:** Todo aquel factor que se atribuya a las acciones, decisiones, performance y técnicas empleadas por la tripulación, así también como por el Control de Tráfico Aéreo (ATC), mantenimiento o el propietario, y que tuviesen implicancia directa en la ocurrencia del accidente.
3. **Sistemas y Equipos de la Aeronave:** Todo aquel factor que se atribuya a las fallas intrínsecas de los distintos sistemas y dispositivos de la aeronave.
4. **Factores Externos:** Todo aquel factor que se atribuya a condiciones ajenas a la aeronave y sus tripulantes, e independiente de la meteorología, y que haya contribuido a la ocurrencia del accidente o a la severidad de los daños asociados al mismo.

Estas categorías, a su vez se desagregan en diversas subcategorías más. Cabe destacar que un accidente suele tener varios factores asociados a la ocurrencia del mismo, por lo que un mismo siniestro puede caer dentro de varias de estas categorías. Asimismo, debe tenerse en cuenta que, si bien se determinan todos los factores asociados a cada accidente, en ningún momento se evalúa el grado de "responsabilidad" de los mismos. En otras palabras, no se cuantifica la incidencia de cada uno de ellos a provocar el accidente.

## RESULTADOS

Entre el año 2004 y 2013 inclusive, utilizando única y exclusivamente informes finales publicados por los distintos organismos encargados de llevar adelante las investigaciones, se encontraron un total de 2344 accidentes aéreos (recuérdese que incluye incidentes graves). Los países de Argentina y Brasil son aquellos que presentan un mayor número de

siniestros, principalmente atribuido a su elevado número de operaciones con respecto a los demás países de la región.



Accidentes totales analizados por país.

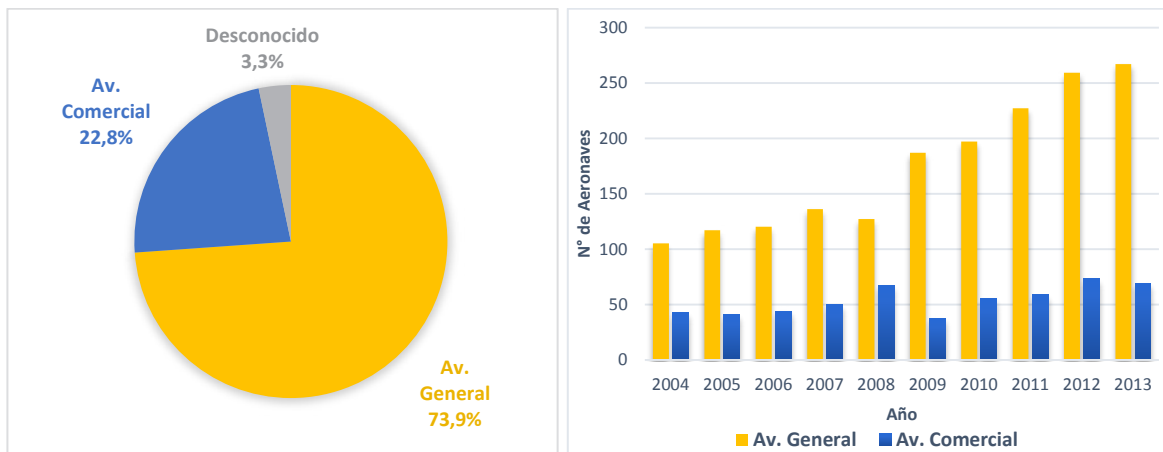
Debe mencionarse que, en algunos países, la disponibilidad de informes en la web es limitada. En particular, los países de Venezuela y Bolivia, recién a partir de los años 2011 y 2012 respectivamente, comenzaron a hacer públicos sus informes.

Accidentes analizados por país y año.

País	Año									
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Argentina	52	72	69	57	57	66	81	64	57	79
Bolivia	0	0	0	0	0	0	0	0	7	3
Brasil	30	21	29	70	72	87	101	85	153	155
Chile	37	29	30	24	34	37	25	37	43	39
Colombia	31	26	30	26	19	29	20	36	30	21
Ecuador	10	14	8	10	10	8	20	18	0	14
Perú	0	8	3	5	12	5	7	5	6	6
Uruguay	0	1	2	0	2	0	2	0	2	2
Venezuela	0	0	0	0	0	0	0	42	35	17

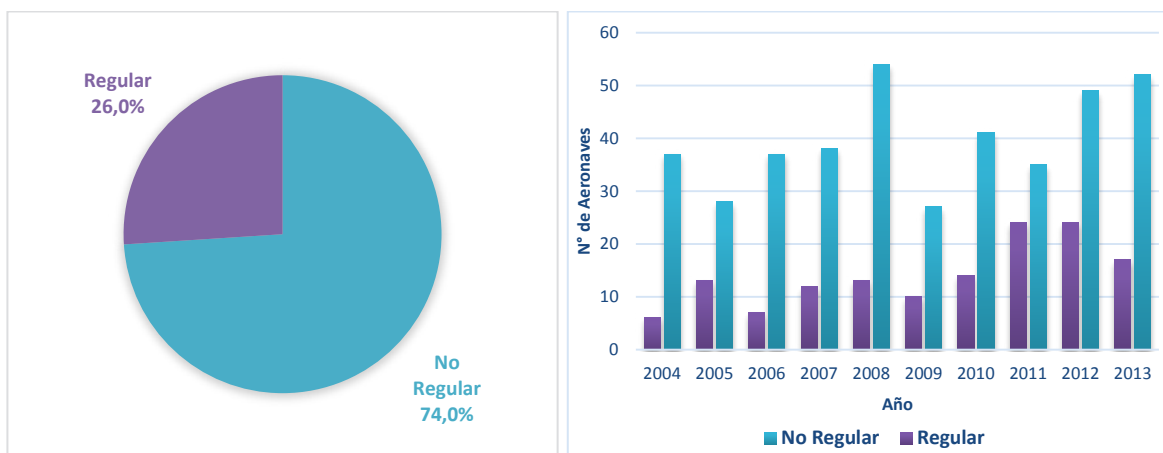
Asimismo, del total de sucesos analizados, aproximadamente un 74% se corresponde con aeronaves realizando operaciones comprendidas dentro de la aviación general, mientras que un 23% operaciones del tipo comercial. En un 3% de los casos no fue posible determinar la operatoria de la aeronave accidentada.





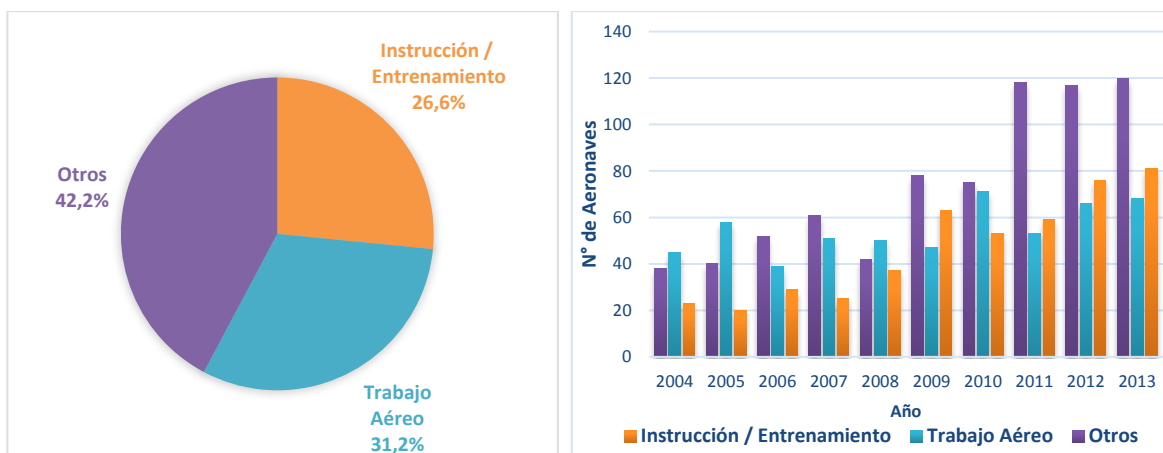
Aeronaves accidentadas por tipo de operación y año.

La aviación comercial puede ser regular o no regular. De las 539 aeronaves involucradas en aviación comercial, en el 74% de los casos analizados las mismas se encontraban realizando operaciones del subtipo No Regular.



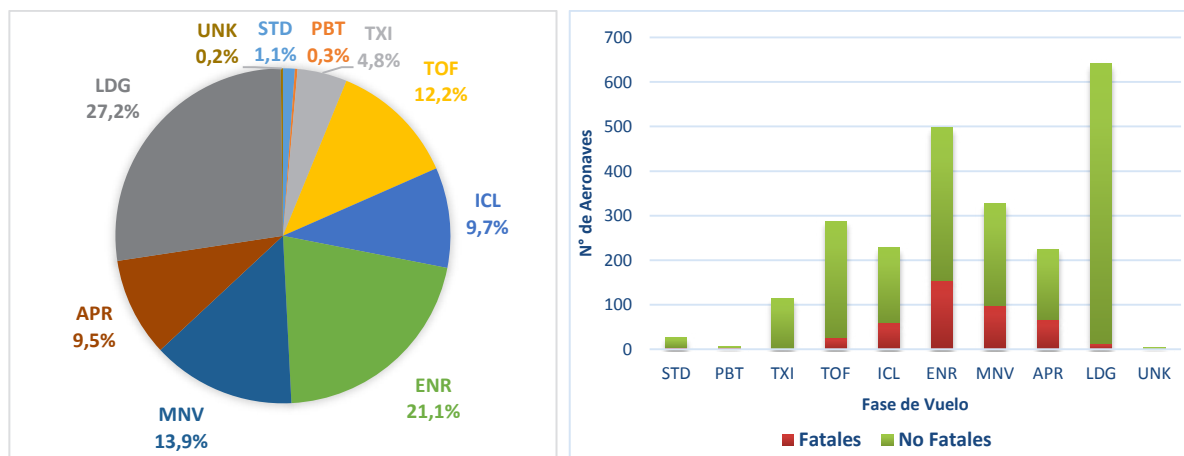
Aeronaves accidentadas por subtipo de operación comercial y año.

Por su parte, la aviación general se divide en diversos subtipos de operación. A los fines prácticos de este informe, se adopta por clasificar las operaciones de las 1755 aeronaves involucradas de 3 formas distintas: Instrucción / Entrenamiento, Trabajo Aéreo y Otros.



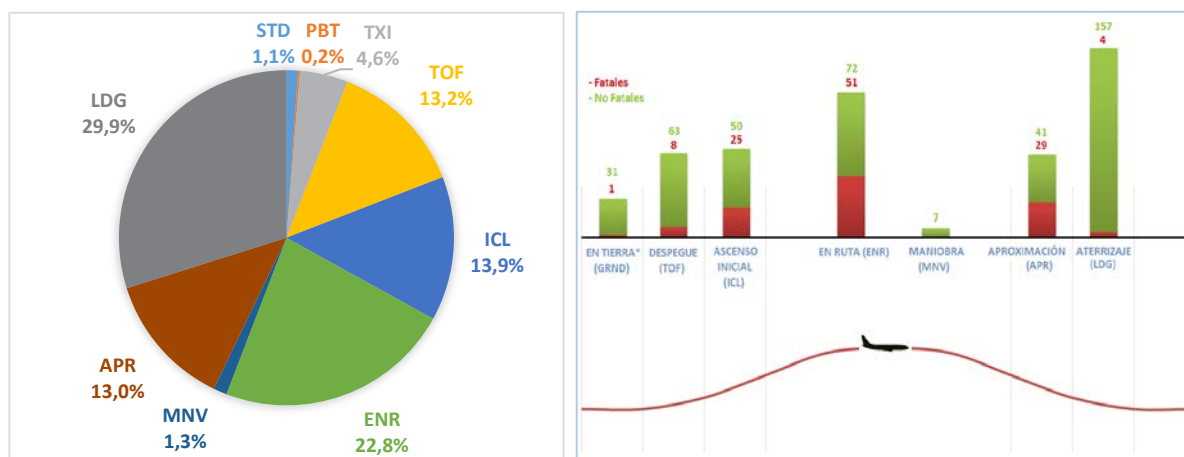
Aeronaves accidentadas por subtipo de operación general y año.

En cuanto a la fase de vuelo se refiere, se encontró que la gran mayoría de los accidentes ocurren durante el aterrizaje.



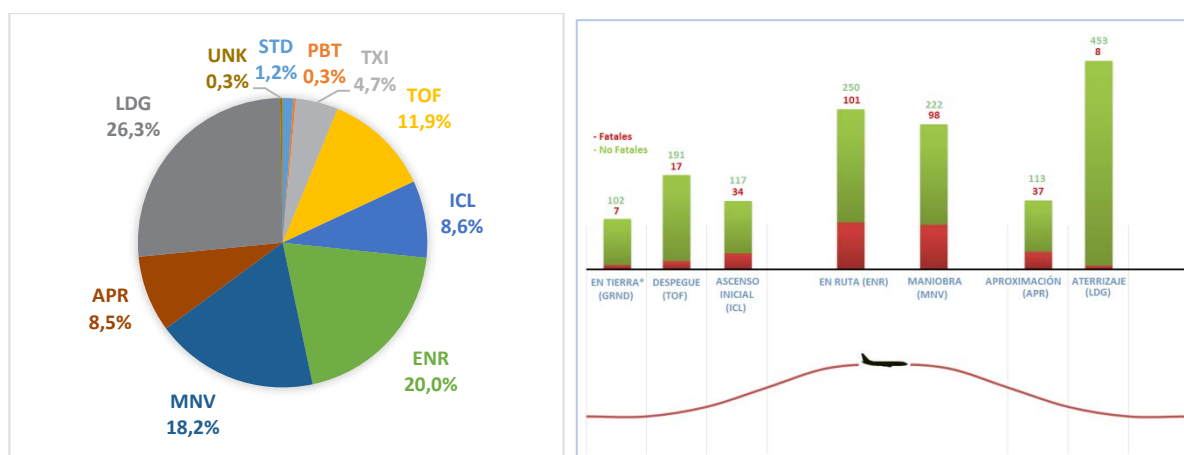
Aeronaves involucradas por fase de vuelo.

En particular, en la aviación comercial, el aterrizaje agrupa un total de 161 sucesos, es decir, aproximadamente un 30% del total.



Aeronaves involucradas por fase de vuelo en aviación comercial.

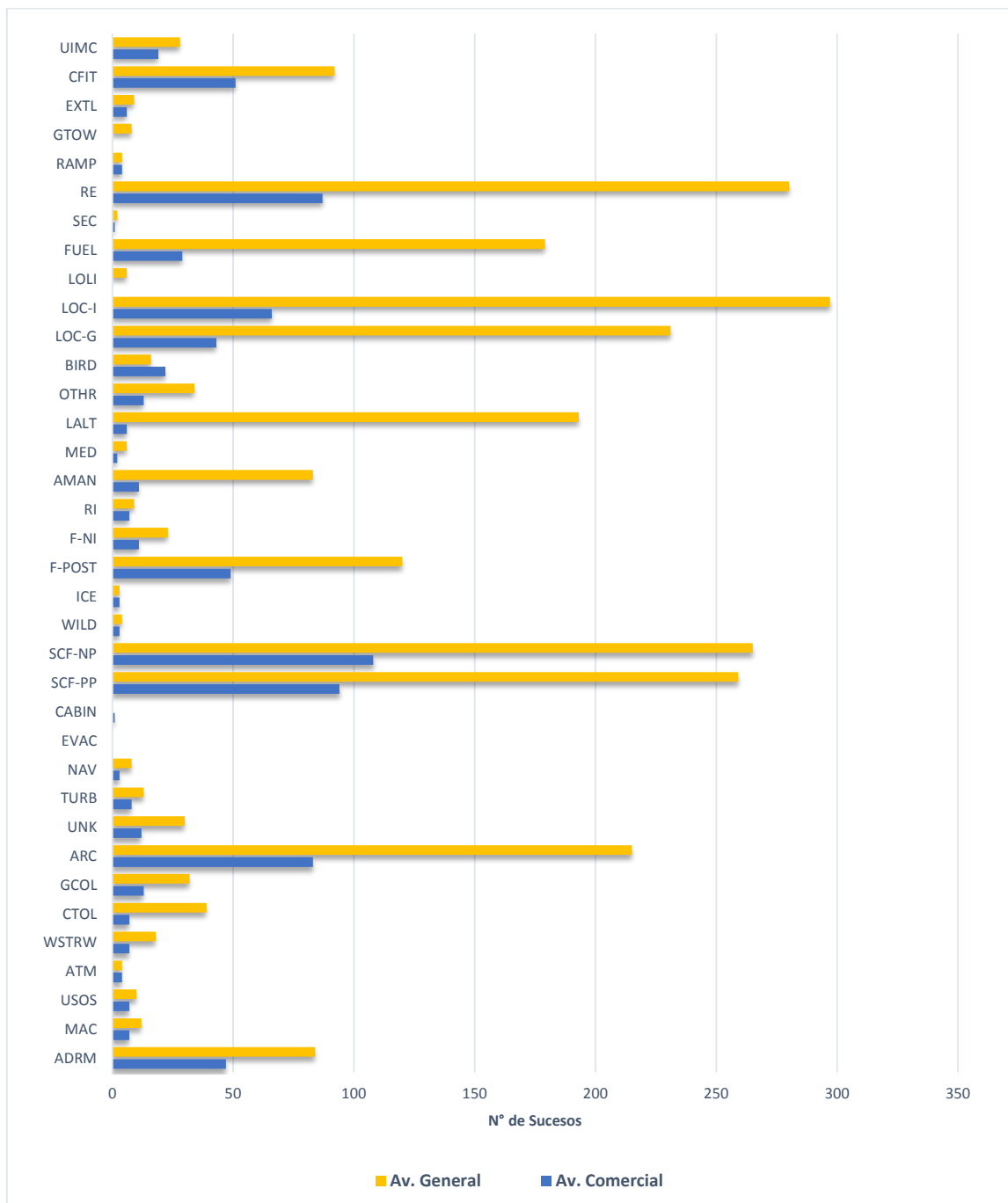
En la aviación general, se contabilizan un total de 453 sucesos en el aterrizaje, es decir, aproximadamente un 26% del total. Se observa también, una gran componente de accidentes ocurridos durante la fase de maniobras.



Aeronaves involucradas por fase de vuelo en aviación general.

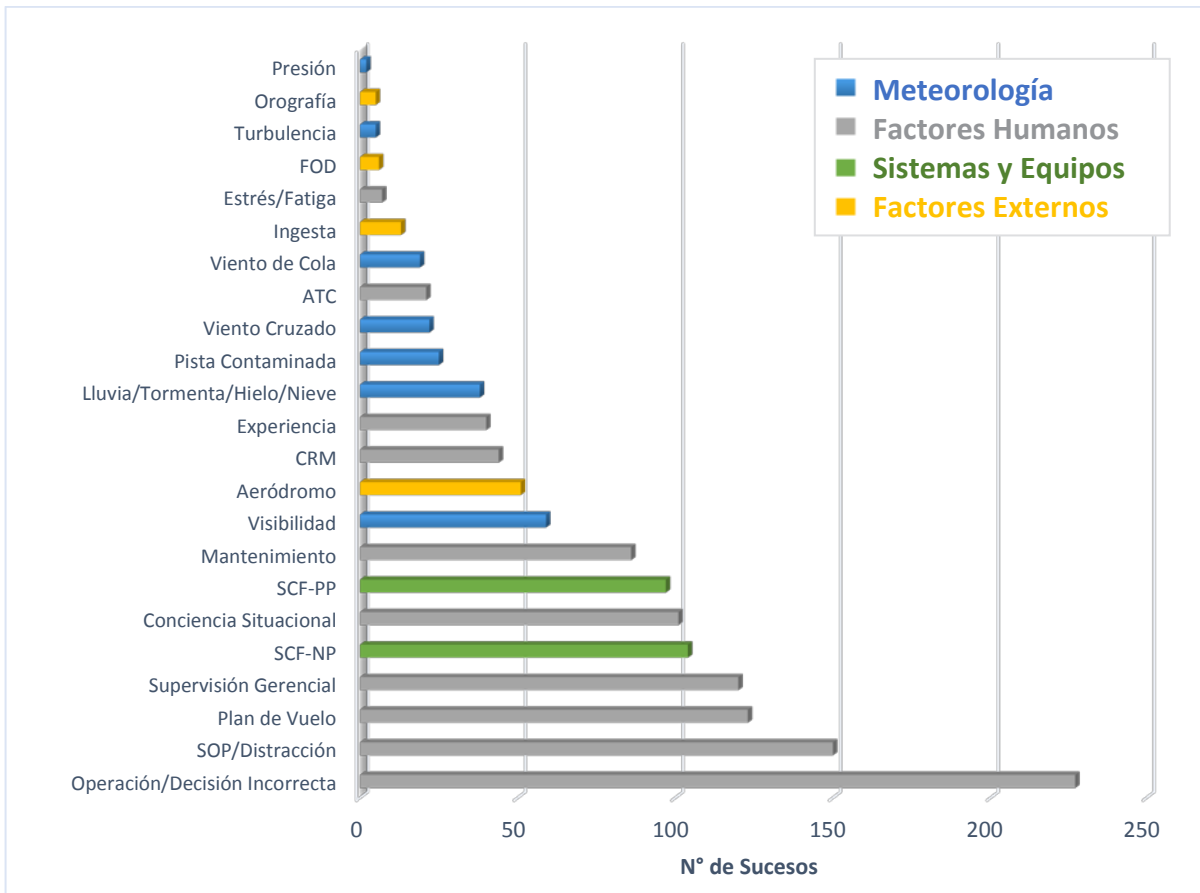
Con respecto a las categorías de sucesos, para la aviación general se encontró que la categoría de suceso más asignada es la pérdida de control en vuelo (LOC-I). También debe destacarse la categoría de excursión de pista (RE).

En cuanto a la aviación comercial se refiere, además de las categorías de LOC-I y RE, se destacan contacto anormal con la pista (ARC) y falla de algún sistema, ya sea del motor (SCF-PP) o ajeno al mismo (SCF-NP).

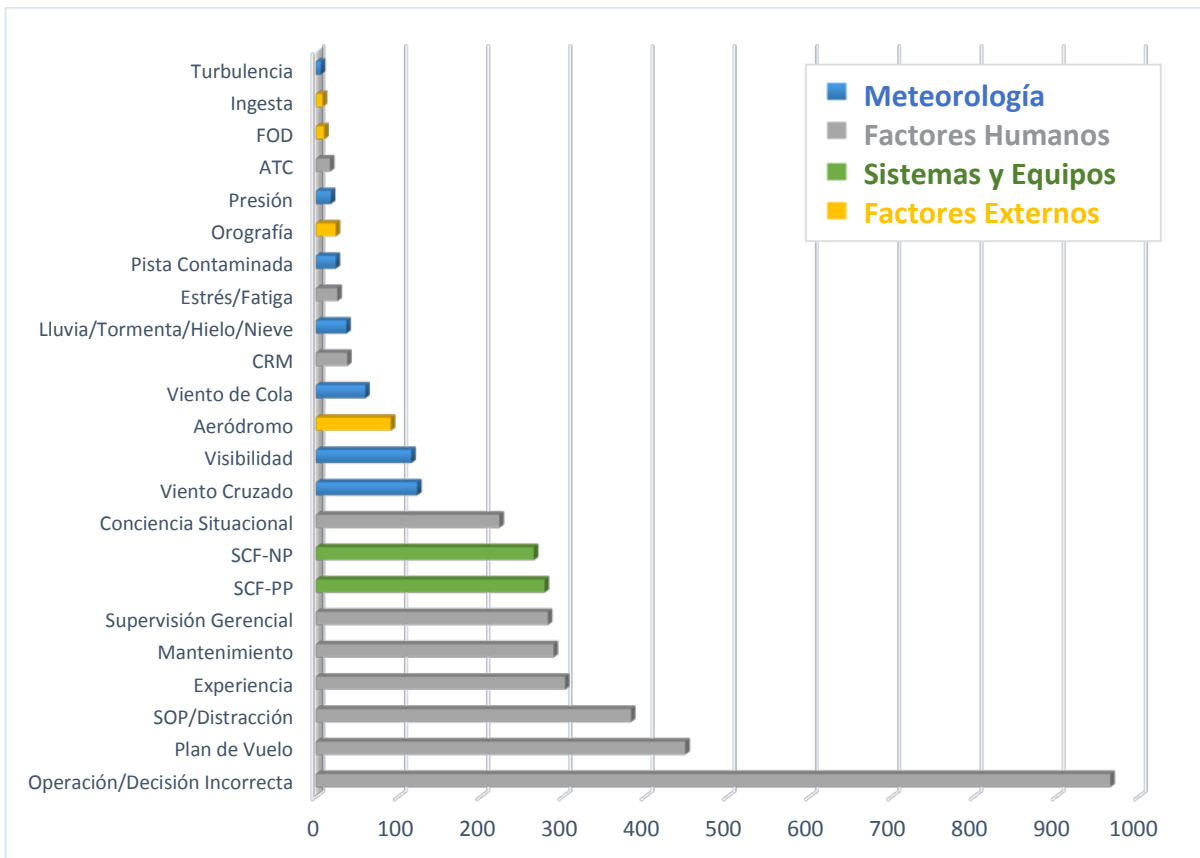


Categorías de Sucesos para los accidentes analizados.

Asimismo, es sabido que existen múltiples factores asociados con la ocurrencia de accidentes aéreos. La operación incorrecta o inadecuada de la aeronave o las decisiones desafortunadas tomadas por la tripulación, son el factor más repetido encontrado en los accidentes analizados.



Factores contribuyentes asociados a accidentes en aviación comercial.



## CONCLUSION

De los 2344 sucesos analizados, en el 74% de los casos las aeronaves se encontraban realizando operaciones enmarcadas dentro de la aviación general.

Un total de 426 sucesos fueron fatales, traduciéndose en 1518 víctimas fatales, ya fueran pasajeros o tripulantes de la aeronave, o personas ajenas a la misma.

La gran mayoría de los accidentes ocurren durante el aterrizaje. El aterrizaje, a diferencia del despegue o de otras fases de vuelo, involucra el control estricto de diversas variables más, con un consecuente aumento en la carga de trabajo de la tripulación, convirtiéndola así en la más propensa a sufrir accidentes aéreos. Ahora bien, proporcionalmente es una de las fases de vuelo donde menor número de accidentes fatales ocurren.

En la aviación comercial, las categorías de sucesos más recurrentes implican la falla o mal funcionamiento de algún sistema, ya sea del motor (SCF-PP) o ajeno al mismo (SCF-NP), el contacto anormal con la pista (ARC), excursiones de pista (RE) y pérdidas de control en vuelo (LOC-I).

En la aviación general, las categorías de sucesos más recurrentes dependen del subtipo de operación que se analice. En el caso del trabajo aéreo, las más repetidas son operaciones a baja altitud (LALT) y pérdida de control en vuelo (LOC-I). En cuanto a vuelos de instrucción y entrenamiento se refiere, las categorías más reiteradas son excursión de pista (RE), contacto anormal con la pista (ARC) y pérdida de control en tierra (LOC-G). Dichas categorías suelen estar asociadas en un mismo accidente, y en la mayoría de los casos, ocurren durante el aterrizaje.

La operación incorrecta de la aeronave o las decisiones desacertadas tomadas por la tripulación, son el factor contribuyente más repetido encontrado en los accidentes analizados. En el caso de la aviación comercial, estos suelen ser consecuencia de negligencias, omisiones o distracciones, sobretodo, a la hora de llevar adelante los procedimientos estándar de operaciones (SOP). En el caso de la aviación general, estos suelen ser consecuencia de otros factores como lo pueden ser la falta de experiencia en la aeronave, una pobre planificación del vuelo o distracciones en cabina.

## BIBLIOGRAFÍA

- Anexo 13 de la OACI. "Investigación de accidentes e incidentes de aviación".
- Taxonomía OACI. "Fase del vuelo".

<http://www.intlaviationstandards.org/>

- Taxonomía OACI. "Categorías de sucesos en aviación".

<http://www.intlaviationstandards.org/>

## ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DEL APORTE CONTAMINANTE GASEOSO EN LOS AEROPUERTOS DEBIDO A LAS OPERACIONES DE LOS VEHÍCULOS DE ASISTENCIA A LA AERONAVE

Sznajderman, Lucas; D'lorio, Juan Ignacio; Coppa, Matías; Di Bernardi Alejandro

Grupo Transporte Aéreo – UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: [sznajdermanlucas@gmail.com](mailto:sznajdermanlucas@gmail.com)

**Palabras claves:** Vehículos de apoyo, contaminación, aeropuerto, operaciones, simulación.

En los aeropuertos, además de existir las emisiones derivadas de la operación de las aeronaves, deben tenerse en cuenta aquellas debido a la operación de los vehículos de apoyo en tierra, denominados en su conjunto como GSE (*Ground Support Equipment*). Los mismos están asociados al transporte de pasajeros desde las terminales a las aeronaves y viceversa, a los procesos de carga y descarga de mercancías y equipajes, al suministro de energía y combustible a la aeronave, al transporte de tripulaciones, entre otros tantos servicios.

El principal objetivo del presente estudio es el análisis de las distintas metodologías de cálculo, donde mediante la utilización de los modelos y de los resultados obtenidos, se busca validar y comparar las distintas herramientas empleadas.

Para efectuar el análisis del aporte de los GSE, se debe caracterizar previamente el tráfico del aeropuerto en estudio, para lo cual se analiza un día promedio del mes pico, en donde se determina un perfil diario de operación y con ello las estimaciones del aporte contaminante mediante distintos software (ACERT, AEDT 2b, entre otros) y bases de datos (ICAO, FAA, EPA).

Por otro lado, el objetivo del trabajo es obtener el peso relativo del aporte contaminante de los GSE respecto a las emisiones totales del aeropuerto en su parte aeronáutica. Para ello se analiza un aeropuerto tipo y se caracterizan tanto las emisiones gaseosas contaminantes generadas por los vehículos de asistencia, como aquellas derivadas de las operaciones aéreas.

El presente estudio se encuentra encolumnado con los objetivos del Comité de Protección Ambiental Aeronáutica (CAEP), conformado por la Organización de aviación civil internacional (OACI), y particularmente con los del Grupo de Trabajo 3 (WG3) centrados en la mitigación de las emisiones gaseosas.

En cuanto a los resultados, se demostraron comparaciones que le dieron validez al uso de los distintos programas, junto a la contaminación de los vehículos de apoyo en relación a las aeronaves utilizadas.



## INTRODUCCIÓN

El volumen del tráfico aéreo mundial se ha ido duplicando una vez cada 15 años desde 1977, y se espera que este crecimiento continúe a pesar de ciclos de recesión cada vez mayores. Se pronostica que el tráfico regular de pasajeros, medido en términos de Revenue Passenger Kilometres (RPK), crezca de cinco mil millones a más de 13 mil millones en el período: 2010-2030, con un promedio anual de tasa de crecimiento de 4,9%. (Airbus 2014)

La consecuencia directa de un crecimiento del tráfico aéreo es un mayor consumo de combustible y una mayor contaminación gaseosa que afecta la calidad del aire, de vida, la fauna y zonas protegidas en las áreas vecinas a un aeropuerto (Lee et al. 2009) . Considerando además que la tendencia temporal de crecimiento urbano lleva a la ciudad hacia las inmediaciones del predio aeroportuario, la anticipada identificación de áreas sensibles a contaminación acústica y gaseosa permite una menor afectación tanto en el desarrollo urbano y como aeroportuario.

En las instalaciones aeroportuarias se produce una gran actividad diariamente, desde la realizada por las aeronaves, a aquellas destinadas a dar asistencia a pasajeros, mercancías y aeronaves en tierra (vehículos handling). En los aeropuertos, además de registrarse las emisiones procedentes de las aeronaves, se determinan como principales fuentes de emisión las procedentes de los vehículos de transporte en accesos y estacionamientos del aeropuerto, las procedentes de fuentes estacionarias (caldera y depósitos de combustible), y aquellas procedentes de vehículos de apoyo en tierra (llamados Ground Service Equipment-GSE) (International Civil Aviation Organization (ICAO) 2011).

El handling engloba entre sus operaciones el transporte de pasajeros desde las terminales a las aeronaves y viceversa, los procesos de carga y descarga de mercancías y equipajes, el suministro de energía y combustible a la aeronave, transporte de tripulaciones, así como todas las maniobras que deben realizarse para situar al avión en posición para efectuar el despegue o el inicio de la rodadura según el caso.

Como se mencionó previamente, las emisiones debido a los movimientos de las aeronaves representan el mayor porcentaje de las emisiones totales producto de la actividad aeroportuaria, en la actualidad se encuentran muy pocos estudios específicos publicados que caractericen y cuantifiquen el porcentaje de los distintos gases contaminantes respecto a las posibles fuentes en un aeropuerto, menos aún que realicen un análisis específico de los GSE. Es decir, no se han publicado análisis que cuantifiquen la cuota parte de las emisiones de los vehículos de asistencia a la aeronave integrando un modelo de uso y operación de los mismos teniendo en cuenta las características de capacidad e infraestructura aeroportuaria.



*Líneas de trabajo y emisiones estimadas para el año 2050.*

Los vehículos de asistencia (GSE) incluyen todos los equipos de servicio en tierra y los vehículos normalmente asociados con los movimientos de la aeronave en la plataforma [3]. Cada uno de estos vehículos poseen distintos tiempos de operación que, debido a su función, y no todos los procesos pueden realizarse simultáneamente.[4]

En concordancia con ello y a los efectos de disponer de valores de referencia se presenta a continuación una tabla descriptiva:

GSE	Función	Tipo de motor	Rango de factor de carga	Servicio por tiempo (min)
Aire acondicionado	Provee aire precondicionado	100-150 KW diésel.	15%-50% carga	Depende del tiempo y agenda
Unidad de aire	Provee aire de alta presión para que prendan algunos motores	150 kw.	90% carga	3-5
Tractor de empuje	Empuje de aeronaves	95kw a 400kw.	25% carga	5-10
Rampa de acceso	Provee acceso	30-65kw.	25% carga	2-10
Catering y servicios	Limpieza y almacenamiento de comida	85-130kw.	10-25% carga	10-30
Lavatorio, agua potable	Almacenamiento de agua y limpieza de baños	120kw.	25% carga	5-20
Colectivo de pasajeros	Transporte de pasajeros	100kw diésel, GNC o nafta.	25% carga	Depende del tiempo y agenda
Camión de combustible	Transferencia de combustible	200kw.	10-50% carga	10-40

*Caracterización de los principales GSE, funciones, tipo de motor y tiempo de servicio. [5]*

## DESARROLLO HIPÓTESIS Y METODOLOGÍA

A continuación, se detalla el proceso para el cálculo de las emisiones gaseosas derivadas de las operaciones de las aeronaves y de los respectivos GSE.

- Identificación de los meses picos del Aeropuerto Jorge Newbery y mezcla de tráfico operativo para esos meses,
- Identificación del ADPM (Average Day Peak Month),
- Análisis de herramientas de cálculo a utilizar,
- Caracterización del flujo de movimientos diario y la hora pico en dicho día,
- Determinación de perfiles de servicio típico según aeronave. Análisis de todos los vehículos handling soporte de cada avión (tiempos de servicio, potencia de motores, factores de carga, entre otros factores considerados),
- Cálculos con los distintos software y bases de datos del aporte contaminante de estos vehículos y el de las aeronaves correspondientes para cada movimiento, y
- Elaboración de tablas comparativas de la contaminación provocadas por aeronaves para un ciclo LTO y por los GSE asociados



### *Proceso lógico de trabajo para determinar la contaminación gaseosa*

Para las emisiones provocadas por los vehículos de asistencia, se utilizaron los datos estándar de servicio de cada vehículo por cada aeronave, sin tener en cuenta los tiempos y recorridos asociados hasta llegar al objetivo, según software AEDT.

### *Movimientos de las aeronaves en el día promedio*

Para las simulaciones se utilizaron los siguientes movimientos para el Aeropuerto Jorge Newbery en el día promedio identificado:

<b>Aeronave</b>	<b>Mov</b>	<b>Arribos</b>	<b>Despegue</b>	<b>Motor</b>	<b>Empresa</b>
Embraer 190	107	55	52	CF34-8E5	GE
Boeing 738W	55	26	29	CFM56-7B27	GE
Airbus A320	64	31	33	CFM56-5B4/2	GE
Boeing 737	78	36	42	CFM56-7B18	GE
Saab SF340	13	6	7	CT7-5A2	GE
Jetstream 31	3	1	2	TFE31-10GT	Allied Signal
McDonnell Douglas MD83	9	5	4	JT8D-217	Pratt & Whitney

*Aeronaves utilizadas y movimientos para el día promedio con indicación de sus respectivos motores*

### *Herramientas de simulación*

En el presente trabajo se utilizaron diferentes herramientas para la simulación (software y base de datos) de los escenarios operacionales con el objeto de obtener datos para el desarrollo de los indicadores, a continuación, se describen los softwares utilizados y la base de datos ICAO:

- Aviation Environmental Design Tool (AEDT Versión 2c, FAA): software que modela el rendimiento de la aeronave y sus vehículos de asistencia en el espacio y tiempo para estimar el consumo de combustible, emisiones, ruido, y las consecuencias de calidad del aire.
- Airport Carbon and Emissions Reporting Tool v3.1 (ACERT): software que cuantifica las emisiones de CO<sub>2</sub> a partir de los movimientos y los tipos de combustibles de las aeronaves y los vehículos de asistencia a las mismas.
- ICAO Aircraft Engine Emissions Databank (edb) v22: base de datos con diversos

Aeropuerto de referencia: Aeroparque Metropolitano Jorge Newbery

	Movimientos de aeronaves			
	Pasajeros	Carga	Aviación General	Total
Aeroparque	10.825.986	7.394	120.492	66.834
Total del SNA	32.647.818	209.120	455.962	455.962
Porcentaje respecto al total en el SNA	33,16%	3,54%	26,43%	14,66%

*Cantidad de tráfico de pasajeros, cargas y aeronaves en Aeroparque Metropolitano y en total de todos los aeropuertos del SNA (Sistema Nacional de Aeropuertos) del país, según estadísticas del ORSNA (Organismo Regulador del Sistema Nacional de Aeropuertos) en el año 2015 [9].*

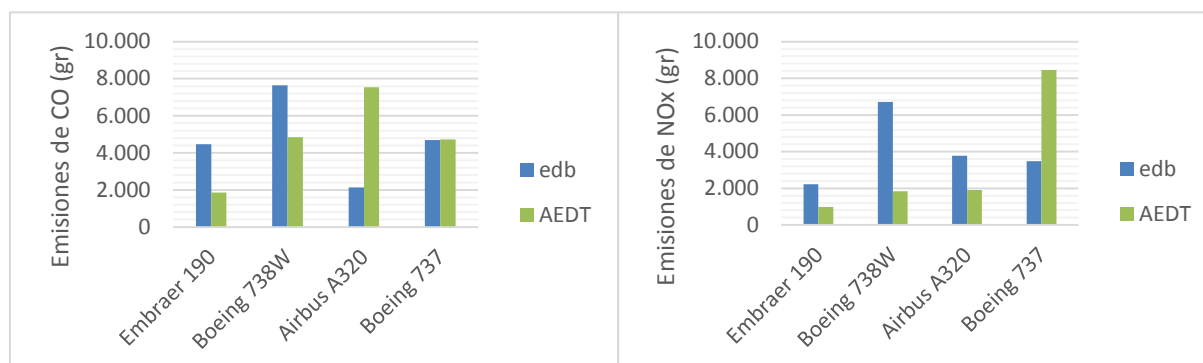
## RESULTADOS

En primer lugar, se presentan los resultados de la cuantificación de las emisiones generadas por movimiento de cada aeronave en el día promedio según el software utilizado y la base de datos, con su respectiva relación.

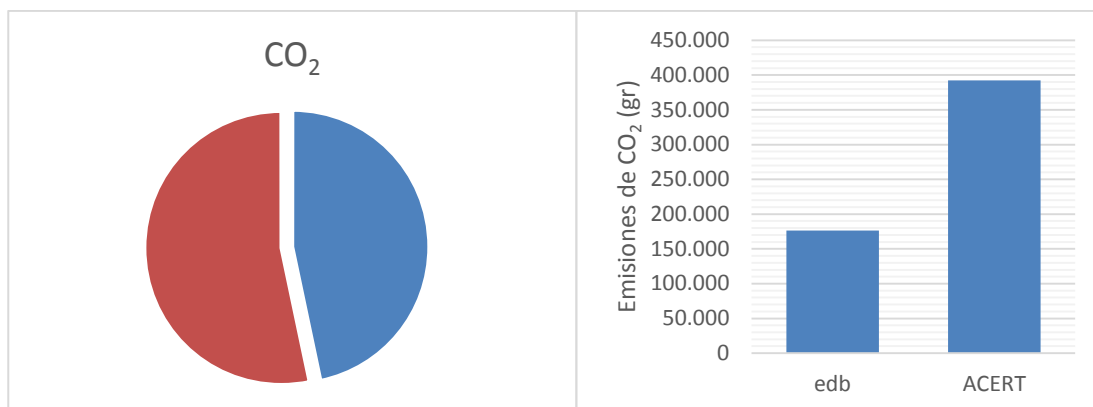
	edb (LTO)			
	LTO por mov		LTO total	
	CO (gr)	Nox (gr)	CO (gr)	NOx (gr)
Embraer 190	4.461	2.222	238.679	118.881
Boeing 738W	7.636	6.719	209.999	184.780
Airbus A320	2.141	3.783	68.522	121.044
Boeing 737	4.689	3.472	182.853	135.396

*Izq: Tabla comparativa de las emisiones de CO y NOx por cada operación de las aeronaves según edb.*

Analizando de forma comparativa las emisiones producto de la operación en el ciclo LTO y los GSE asociados se presenta a continuación los resultados para las emisiones de CO y NO<sub>x</sub>:



*Izq: Comparación de las emisiones de CO de la base de datos edb y el software AEDT en el ciclo LTO por movimiento de cada aeronave. Der: Comparación de las emisiones de NOx de la base de datos edb y el software AEDT en el ciclo LTO por movimiento de cada aeronave.*



Izq: Comparación de las emisiones de CO<sub>2</sub> de las aeronaves en el ciclo LTO y los vehículos de apoyo con el software ACERT. Der: Comparación de las emisiones de CO<sub>2</sub> de las aeronaves en el ciclo LTO del software AEDT 2c y la base de datos edb.

## CONCLUSIONES

A partir del trabajo realizado, respecto a las emisiones debido a la operación de aeronaves utilizando el software AEDT y de los cálculos con la base de datos de ICAO, se observa que los resultados obtenidos poseen un mismo orden de magnitud particularmente en el CO con una variación de aproximadamente 30% en promedio de todas las aeronaves, mientras que en el NO<sub>x</sub>, esa relación fue del doble. Vale decir, que la relación son los valores obtenidos del edb sobre el software. Si bien el ciclo analizado es el mismo (tiempos y potencias respectivas) y el AEDT utiliza como base de datos la de ICAO la diferencia radica principalmente en la modelización e hipótesis propias del programa.

Por otro lado, comparando las emisiones de los GSE con aquellas producto de las operaciones de las aeronaves, se observa que el porcentaje es mayor al esperado donde el aporte de CO es de 60% aproximadamente a las emisiones totales (aeronaves y GSE) y el del NO<sub>x</sub> alcanza el 44%. La diferencia principal en entre dichos porcentajes tiene que ver con las emisiones propias del tipo de combustible utilizado por los GSE.

Para lograr una caracterización completa y así determinar los pesos relativos de todas las emisiones gaseosas producto de la actividad aeroportuaria este tipo de estudio debe ser complementado con análisis de sensibilidad de variables de las otras fuentes presentes en un aeropuerto provenientes tanto de la Parte Pública, Parte Aeronáutica, como de los Elementos de apoyo al aeropuerto.

## REFERENCIAS

- [1] International Civil Aviation Organization, "Global Air Navigation Plan Fourth Edition," pp. 1–128, 2013.
- [2] A. Report, "Annual Report 2014-2015," 2015.
- [3] EUROPEAN ORGANISATION NAVIGATION FOR THE SAFETY OF AIR, "Airport Local Air Quality Studies," 2005.
- [4] T. Horstmeier and F. De Haan, "Influence of ground handling on turn round time of new large aircraft," *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.*, vol. 73, no. 3, pp. 266–271, 2001.
- [5] ICAO, *Airport air quality manual*, vol. 1. 2011.

- [6] K. Johnson, S. E. Bennett, A. S. Highway, L. Rock, S. Grossman, E. Potts, and L. Mckee, *REPORT 149 Improving Ground Support Equipment Operational Data for Airport Emissions Modeling*. .
- [7] S. Rosenbloom, D. H. Butler, J. Robert E. Skinner, V. a. Arroyo, J. B. Barker, W. a. V. Clark, J. Eugene A. Conti, J. M. Crites, and P. J. C. Hammond, *Airport Ground Support Equipment (GSE): Emission Reduction Strategies, Inventory, and Tutorial*. 2012.
- [8] A. F. A. Aeropuerto, D. S. Rafael, and D. I. Tránsitos, “Movimiento operacional de los aeropuertos del Sistema Nacional Aeropuertos del SNA Pasajeros,” pp. 5–6, 2015.
- [9] MADHEL Manual De Aeródromos y Helipuertos, Dirección Nacional de Inspección de Navegación Aérea Dirección Regulación, Normas y Procedimientos. Departamento Información Aeronáutica.



## **ANÁLISIS DE CONFLICTOS EN FLUJOS DE PARTIDAS EN PEQUEÑAS TERMINALES DEL SISTEMA NACIONAL DE AEROPUERTOS**

Nicolás Vitale, Pablo E.M. Szlagowski, Remedios Casas, Pablo Di Gregorio, Alejandro Di Bernardi

Grupo de Transporte Aéreo – UIDET GTA-GIAI. Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: [vitalenicolas@hotmail.com](mailto:vitalenicolas@hotmail.com)

### **RESUMEN**

Este trabajo tiene por objeto señalar algunos conflictos en áreas y flujos de partidas en terminales de pasajeros en aeropuertos, principalmente de reducida escala y cantidad de operaciones, referidos al procesamiento que se realiza a los pasajeros y las áreas y servicios que éstos disponen para su uso y permanencia.

La actualización, la incorporación de nuevas tecnologías, la ampliación o puesta en norma de estos edificios son principalmente el origen de estos conflictos, como también la falta de recursos y de planificación de todas las infraestructuras.

### **PALABRAS CLAVE**

Terminales, aeropuertos, planificación, transporte, flujos.

### **INTRODUCCIÓN**

Las terminales aéreas no sólo son un nexo entre el transporte aéreo y algún otro sistema de transporte, principalmente terrestre, sino que además de contener los flujos que conectan éstos sistemas contienen áreas destinadas al tratamiento y servicios al pasajero, a las operaciones, administración, seguridad, concesionarias, entre otros. Con la aparición de nuevas necesidades se generan nuevos conflictos no contemplados en muchos casos en la etapa de proyecto, o simplemente en la omisión de una búsqueda de flexibilidad previendo otras formas de utilización de las infraestructuras a las que dieron origen.

Aparecen entonces nuevas necesidades que pueden estar relacionadas a cambios en las políticas de estado, nuevos controles, cambios en la flota de las aerolíneas que operan, cambios en los destinos servidos, u otros cambios en las operaciones que van a verse reflejados en los requerimientos de las infraestructuras provistas desde el lado tierra.

Las recomendaciones de organismos internacionales con respecto a las características de estos flujos y sus áreas no sólo buscan cumplir con requerimientos de seguridad, sino que también buscan el confort para el pasajero, quien es el principal usuario de las instalaciones. Cumplir con dichas recomendaciones no siempre es garantía de un buen resultado; en muchos casos los manuales y estudios que se realizaron para conseguir líneas de planificación fueron en base a aeropuertos con niveles de demanda superiores; así como también otros criterios y estándares de uso asociado a la idiosincrasia propia de cada región.

La ausencia de acciones en la actualización de sistemas o puesta en norma de estos edificios son principalmente el origen de estos conflictos, como también la falta de recursos y la escasa planificación de todas las infraestructuras.

En este contexto, este trabajo tiene por objeto señalar algunos conflictos en áreas y flujos de partidas en el edificio terminal de pasajeros principalmente de pequeña escala y cantidad de operaciones, referidos al procesamiento que se realiza a los pasajeros y en relación a las necesidades de instalaciones y superficies requeridas para el procesamiento, servicio, confort y seguridad del pasajero.

## METODOLOGÍA

En cuanto a la metodología, se utilizan como base de análisis relevamientos sistemáticos realizados por este grupo de trabajo en el marco de la realización de planes maestros de aeropuertos del Sistema Nacional concesionados o administrados por el Estado. Estos relevamientos incorporan estudios de las instalaciones del lado aire y lado tierra, visita a campo, entrevistas con administradores, personal operativo y administrativo de los aeropuertos, relevamientos dimensionales y registros fotográficos del estado de situación de cada instalación aeroportuaria.

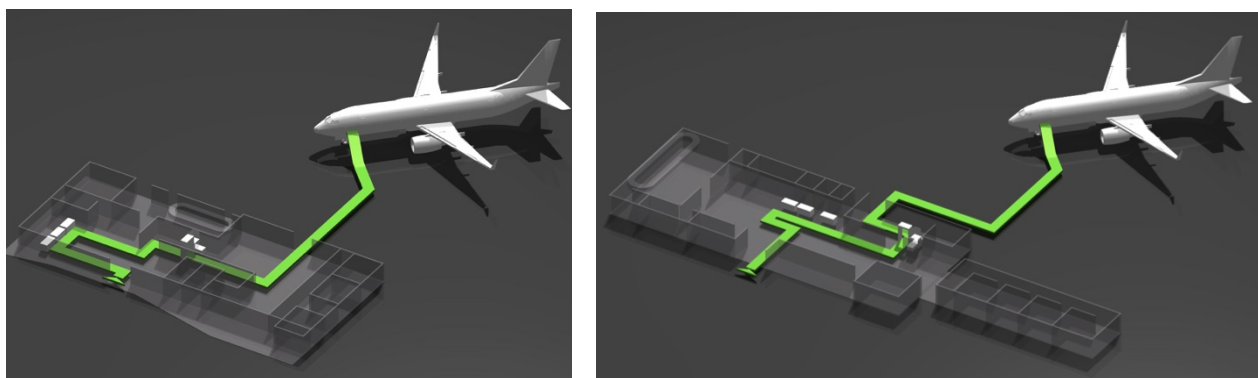
Se comparan los datos obtenidos con estudios de demanda realizados por medio de diferentes metodologías estándar como Average day peak month de FAA, Típical peak hour passenger de FAA y Busy day de IATA, para luego, una vez determinado el pasajero en hora punta de diseño, pasar a verificar las dimensiones necesarias utilizando el Airport development Reference Manual de IATA.

De dicha contrastación surgen condiciones particulares de cada tipo de aeropuerto y del estudio objetivo por parte de formulas algunas incompatibilidades, dado que dichas fórmulas están concebidas para ser utilizadas en aeropuertos de mayor cantidad de operaciones y movimiento de pasajeros.

Este trabajo no intenta mostrar los datos duros obtenidos ni el análisis fino de cada área, sino que se centra en reflexionar sobre los conflictos que surgen de la falta de flexibilidad de las terminales en cuestión.

## DESARROLLO

Según datos de IATA para el año 2035 la demanda de pasajeros de la región se duplicará, pasando de 300 millones de pasajeros por año a 660 millones. Es necesario adaptar las infraestructuras para cubrir esa demanda y aprovechar al máximo los beneficios económicos que la industria podría brindar.



Esquema de flujo de partidas en las terminales de Rio Cuarto y Puerto Madryn.

Para el análisis de la problemática tratada se establece un listado de áreas comprometidas con el flujo caso de estudio:

Facturación  
Control de seguridad  
Control de migraciones  
Embarque

## Facturación

Con la aparición de nuevas tecnologías en la facturación para un vuelo se desarrollaron también nuevas configuraciones de mostradores de check in, diferentes a los tradicionales mostradores asignados por líneas aéreas se le sumaron los de uso común o sistemas CUTE (Common Use Terminal Equipment) los cuales otorgan mayor flexibilidad al uso de las áreas de mostradores de facturación, asignando a requerimiento de la gestión aeroportuaria cada uno de los puestos de atención. Este sistema representó un buen camino visto desde la eficiencia potencial de uso de las instalaciones del edificio terminal. Más adelante la incorporación de las estaciones de autoservicio de check in permitieron realizar por parte de los pasajeros su trámite de facturación, sin la necesidad de estar frente al personal de la línea aérea imprimiendo su boarding pass para luego embarcar de forma directa. Sin embargo la tecnología actual permite ir más lejos, a través de un ordenador o un teléfono móvil realizar con sencillez este procedimiento, incluso con la posibilidad de elegir el asiento, realizar algún cambio en la reserva y confirmar el vuelo. Estos sistemas permiten imprimir el boarding pass o utilizar un código QR como boarding pass electrónico.

Cualquiera de estos cambios en las tecnologías de facturación tienen sus beneficios pero también requieren de actualizaciones en los sistemas e instalaciones de aeropuertos mas chicos y con menor volumen de tráfico. Un pasajero que realizó e imprimió su billete para salir de Aeroparque no tiene que acercarse a un mostrador de la línea aérea hasta el control de embarque; sin embargo si ese mismo pasajero intenta realizar el este procedimiento en cualquier aeropuerto que no posea los lectores ni el sistema para procesar esa impresión tendrá que realizar la facturación de manera convencional frente a un mostrador de la aerolínea, procedimiento por el cual seguramente no contabilizaba el tiempo que le iba a destinar pudiendo generarse demoras en este proceso.

Es importante remarcar este aspecto ya que la industria propone una estandarización de criterios tendiente a eliminar errores y potenciales conflictos pero por otro lado las cuestiones económicas asociadas impiden tales desarrollos.

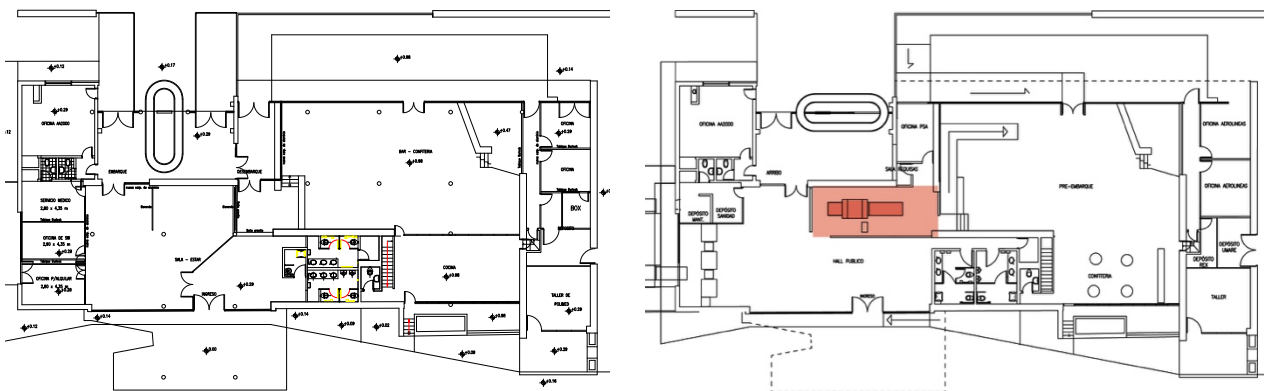


Vista de check in online, aplicaciones para generar el boarding pass en celulares y kioscos de self check in.

## Control de seguridad

La implementación de controles por parte de organismos de seguridad a todos los pasajeros hizo que las terminales que estaban diseñadas para realizar la espera y el embarque en un mismo sector debieran gestionar áreas discriminadas diferenciando sectores públicos de sectores estériles. Es éste el caso de la terminal del aeropuerto de Santa Rosa, en donde la incorporación de vuelos regulares generó el requerimiento de un sector para la instalación del control de seguridad, control que consta de un escáner para el equipaje no despachado y un arco de detección de metales para los pasajeros que van a embarcar, un área sensible para que el detector funcione correctamente y un sector para inspeccionar al pasajero en caso de dar afirmativo dicho control. Este nuevo control está ubicado prácticamente en la puerta de embarque donde también se controla que el pasajero esté en lista de pasajeros realizándolo al momento de acceder a la aeronave, lo que se constituye en una demora innecesaria.

Aeropuertos de menor dimensión con menor cantidad de operaciones y pasajeros como los casos de Reconquista provincia de Santa Fe o General Pico en La Pampa y que no poseen actualmente estos controles pero que posiblemente sean modificados para albergarlos en un futuro, van a sufrir una clara restricción del espacio destinado a los pasajeros en cuanto estas instalaciones sean incorporadas.



Esquema de planta anterior y posterior a la incorporación del control en aeropuerto de Rio Cuarto.

## Control de Migraciones

La incorporación de nuevos destinos que opera el aeropuerto puede observar como requerimiento la necesidad de realizar otros controles a los pasajeros que no se realizaban previamente. Si se incorpora un nuevo destino internacional, el control de migraciones en partida será un requerimiento obligatorio, el mismo modificará no solo las instalaciones, sino que también los tiempos de procesamiento de los pasajeros, y por ende el tiempo de estancia de los mismos dentro de la terminal.

Mayor tiempo dentro de la terminal por parte de los pasajeros requiere de mayores áreas de servicios, y no siempre se cuenta con las superficies para poder acomodar dichos servicios.

Nuevas tecnologías podrían resolver esta falta de espacio físico. Los controles fronterizos automáticos requieren de menor superficie dentro de la terminal, no requieren de personal, lo cual también reduce el costo de darles servicio y áreas destinadas a tal efecto. Dichos controles son de uso frecuente en algunos aeropuertos de Europa, Medio Oriente y Estados Unidos.



Vista de un control automático de migraciones.

## Embarque

Cuando se estudian los flujos dentro de una terminal, se entiende que el pasajero no arriba al aeropuerto en el momento del embarque, y que los controles de seguridad, gubernamentales y de las aerolíneas exigen que lleguen con un tiempo de antelación diferenciado dependiendo del tipo de destino. Es entonces en donde las áreas de espera funcionan como un fuelle entre el tiempo de arribo y el momento del embarque a la aeronave.

Estas áreas van a requerir brindarle al pasajero el confort que se pretende otorgar y cumplir con requerimientos de los organismos de control, respetando áreas mínimas, cantidad de personas sentadas y paradas, servicios, etc., y generalmente se encuentran en el sector estéril de la terminal; esto quiere decir que el acceso a éstas es por medio de un control al que se somete al pasajero luego de haber pasado por los mostradores de facturación.

Los servicios que se prestan a los pasajeros deberían entonces repetirse tanto del lado estéril como del lado público, ya que para su uso el pasajero no debería estar pasando por el puesto de seguridad. Esto conlleva una doble inversión en obras y un requerimiento de superficie mayor. Es por eso que en algunos casos se opta por tener un solo sector gastronómico; el conflicto aparece cuando se decide de qué lado de los controles está dicho sector.

Sin embargo no siempre se cumple esta condición: hay casos en donde los locales gastronómicos funcionan como áreas de espera ya que el área de embarque no posee la superficie, comodidades ni servicios para la demanda de pasajeros. Estas áreas pueden estar ubicadas en el sector público de la terminal, como es el caso de la terminal de Santiago del Estero. Esto reviste una serie de complicaciones: puesto que la espera se realiza en el área pública del edificio, el control de seguridad va a tener que ser realizado en el momento del embarque, pudiendo generar demoras en las operaciones eliminando la posibilidad de operar dos vuelos simultáneamente.

En el caso de la terminal del aeropuerto de Rio Cuarto el local gastronómico se encuentra dentro del área estéril donde sólo puede ser utilizado por los pasajeros y no por los familiares que acompañan o esperan, reduciendo el tiempo de utilización en el período en que el control se encuentra operativo.





Vista de sector gastronómico de la terminal de Santiago del Estero y de Río Cuarto

## CONCLUSIONES

Realizar una ampliación o un cambio en las operaciones de un aeropuerto implica cambios en las instalaciones, tanto del lado aire como del lado tierra, en las terminales de pasajeros y vialidades de acceso y circulación vehicular.

Claramente la falta de espacio en los edificios y el gran costo que significa agregar nueva superficie o actualizar instalaciones genera nuevos conflictos a la hora de incorporar a un perímetro definido nuevas funciones. La falta de flexibilidad de los proyectos originales y la falta de tiempo para análisis de alternativas de desarrollo en muchos casos impulsa a realizar obras para adaptar las infraestructuras a las operaciones en corto tiempo. Obras que en mucho de los casos son solamente resolutorias del problema a corto plazo y que ante eventuales nuevos cambios en la operatividad no resulta de utilidad.

En respuesta a la falta de superficie en las terminales se podría bajar el nivel de servicio que se da al pasajero, esto quiere decir en términos generales, que a cada pasajero le vamos a destinar menor superficie. Bajar el nivel de servicio significa también reducir los ingresos por servicios que se cobra a las líneas aéreas.

El concepto de edificio flexible, entendido como la posibilidad de sufrir cambios y adaptaciones sin modificarse sustancialmente no debería dejarse de lado a la hora de la planificación y diseño de nuevas terminales aeroportuarias, aprovechando al máximo los recursos invertidos en éste sin saber cuál podría ser el destino final de utilización.



## ANÁLISIS DE TORRES DE CONTROL EN AEROPUERTOS CONTROLADOS DEL SISTEMA NACIONAL AEROPORTUARIO

Santiago Pezzotti; Sergio Pitrelli, Pablo Di Gregorio, Alejandro Di Bernardi

Grupo Transporte Aéreo – UIDET GTA-GIAI, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Buenos Aires, Argentina. Correo electrónico: [santiago.pezzotti@ing.unlp.edu.ar](mailto:santiago.pezzotti@ing.unlp.edu.ar)

*Palabras clave: Torre de Control, Navegación Aérea, Aeropuertos, Sistema Nacional Aeroportuario*

La creciente demanda de operaciones aéreas requiere de infraestructura acorde a los estándares internacionales a fin de satisfacer los pilares fundamentales en los que se basa la aviación: seguridad, regularidad y eficiencia.

En ese contexto, uno de los edificios y servicios esenciales en aeropuertos complejos resulta la Torre de Control y el Control de Tránsito Aéreo; por cuanto en ellas no solo se gestiona, controla y supervisa el tráfico en el espacio aéreo asociado, sino también las operaciones en tierra (pistas, rodajes y plataformas).

A tal efecto, sus características físicas y constructivas, disponibilidad de equipos y emplazamiento resultan los principales aspectos a considerar a la hora de evaluar los estándares de detección, reconocimiento e identificación definidos en la normativa de aplicación.

No obstante lo anterior, la realidad observada por el Grupo de Transporte Aéreo (GTA) en ocasión de los diversos relevamientos de campos realizados en 30 de los principales aeropuertos del Sistema Nacional de Aeropuertos (SNA), revelan diversidad de criterios a la hora de construir la infraestructura necesaria y operar estos servicios, presentando condiciones adicionales a considerar para la adecuada prestación.

Por todo ello, en el presente documento se presentan requerimientos y posibles mejoras a realizar en algunas Torres de Control del Sistema Nacional de Aeropuerto mediante un análisis de las distintas variables puestas en juego; de modo que se permitan valorar los aspectos señalados mediante la determinación de indicadores, construidos en base a los siguientes criterios:

- La situación relevada durante los trabajos de campo.
- La aplicación de software específico que permite valorar las condiciones de visibilidad en función de los datos recabados en el punto previo (Air Traffic Control VisibilityAnalysisTool).
- La aplicación de nociones y conceptos de planificación en función de las características y particularidades operativas de cada aeropuerto.

## INTRODUCCIÓN

Los planes maestros aeroportuarios plantean y describen, entre otros, el desarrollo operacional, físico geométrico, ambiental, y económico financiero de un aeropuerto a través del planteo de diferentes etapas de crecimiento según pautas establecidas. Para ello resulta necesario definir un punto de partida que permita plantear diferentes escenarios operacionales de desarrollo en los que plasme la evolución del aeropuerto a corto, mediano y largo plazo, según diferentes modelos de: demanda real (necesidad - hito operacional), seguridad operacional, y / o modelo de negocio, en un todo de acuerdo con el rol asignado a dicho campo de vuelo.

En este contexto una de las actividades principales está relacionada con el relevamiento de campo ya que busca determinar el estado de situación del aeropuerto. Dentro de estas actividades está la determinación de la ubicación en el predio aeroportuario y la determinación de las características geométricas operativas de la Torre de Control (TWR) ya que en ellas no solo se gestiona, controla y supervisa el tráfico en el espacio aéreo asociado, sino también las operaciones en tierra (pistas, rodajes y plataformas). Para poder cumplir con seguridad, regularidad y eficiencia las funciones que le son propias, resulta entonces necesario, definir más allá del equipamiento tecnológico, el emplazamiento de la TWR respecto de las zonas operativas del aeropuerto, su altura relativa y las capacidades de observancia desde el fanal de la misma.

En este contexto, en el relevamiento de campo se analizan todas las características de las TWR, los entornos del área de movimientos de cada aeropuerto, las visiones reales que desde la misma se disponen, y las problemáticas evidenciadas por los controladores. Luego se analizan en gabinete las capacidades teóricas de la TWR mediante la aplicación de un software específico para luego plantear posibles sobre dichas instalaciones.

## DESARROLLO

Para el desarrollo del presente análisis se tuvo en cuenta la información recogida en los trabajos de campo relacionados con el desarrollo de 30 Planes Maestros del Sistema Nacional Aeroportuario (SNA), 26 de los cuales, pertenecen al grupo A, concesionados AA2000 y los 4 restantes al grupo B, otros concesionarios y no concesionados.

Con la información disponible se analizan las problemáticas encontradas en los relevamientos de campo, para luego realizar un estudio teórico mediante la aplicación de un software específico para finalmente realizar un análisis integrado y concluir acerca de las problemáticas y posibles mejoras.

### Relevamientos

Los trabajos de campo permiten observar la condición operativa real de cada una de las Torres de Control. Si bien, teóricamente se ubican de manera estratégica de modo de poder cubrir visualmente todos los sectores del área de movimientos, diversas circunstancias pueden hacer que la operatividad se vea afectada, tanto por motivos antrópicos como naturales.

Como primera medida se ordenan, según la clasificación indicada en la siguiente figura, las problemáticas analizadas en las 30 TWR:

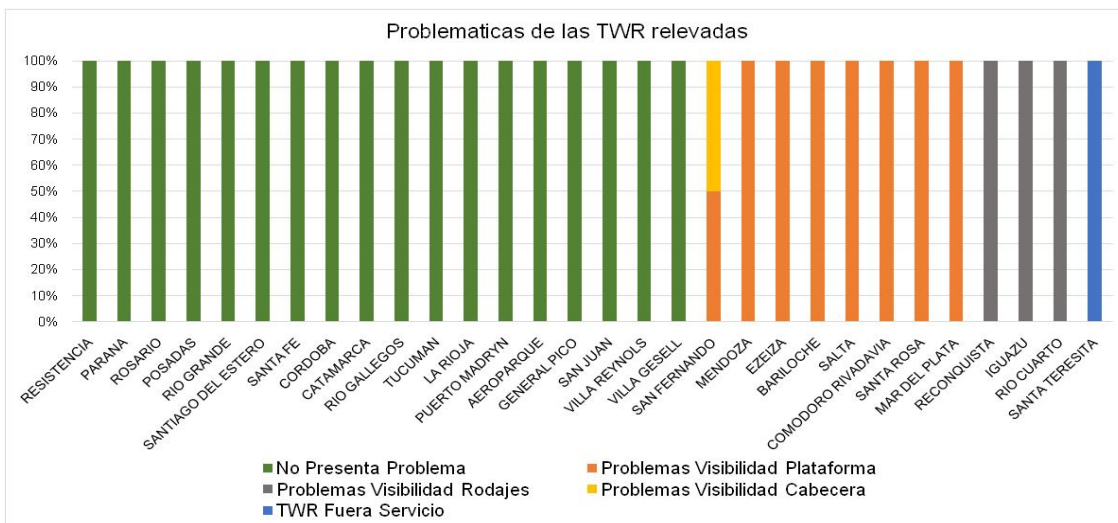


Figura 1– Problemática de cada Torre de Control.

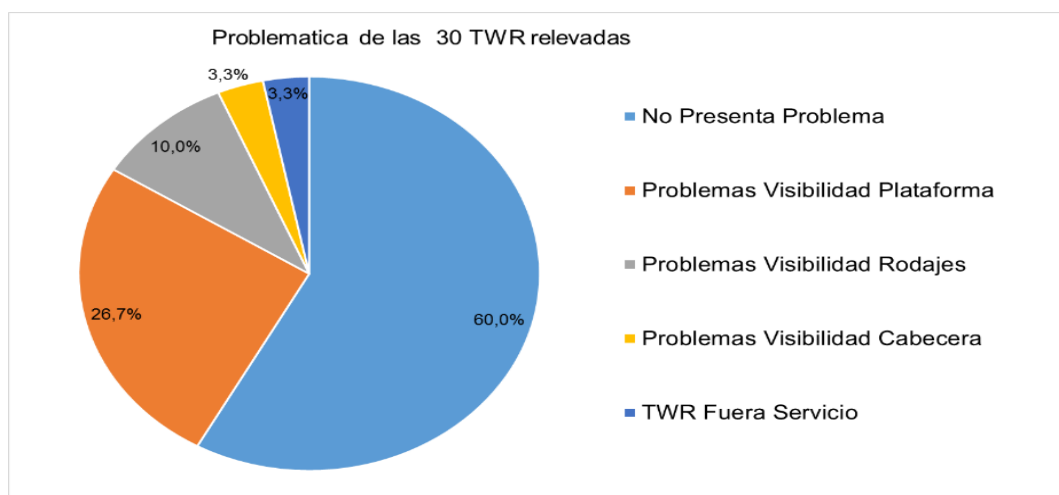


Figura 2– Análisis de problemáticas de las Torres de Control analizadas.

Una vez ordenadas las problemáticas, se clasifican y analizan las diversas causas de pérdida de visibilidad desde la torre:

Causas naturales	Causas antrópicas
Crecimiento de la vegetación en el predio aeroportuario	Obras de infraestructura en el entorno a la torre.
	Por obras de infraestructura dentro del predio aeroportuario
	Iluminación nocturna

Tabla 1 –Clasificación de causas

Los predios aeroportuarios suelen tener grandes extensiones (entre 100 y 3.500 ha) y si bien, en la mayoría de los casos, el área operativa es menor lo cierto es que el control de la vegetación en su interior resulta siempre complejo por cuanto no solo depende del clima imperante en el emplazamiento sino también de aspectos ambientales o legales que pueden imposibilitar la eliminación de la vegetación arbórea dando así lugar a posibles interferencias (conos de sombra) del área operativa.

En este contexto y con el fin de evidenciar una de estas problemáticas se presenta a continuación la situación que se da en el aeropuerto de Reconquista, donde la pista 28 presenta umbral desplazado en virtud de la presencia de un monte de árboles que imposibilitan la visión de dicho sector operativo.



Figura 3– Zona de sombra de cabecera 28, aeropuerto de Reconquista.

Otra problemática que puede surgir es la relacionada con las necesidades de ampliación de infraestructura en el entorno de la TWR. El caso más común está relacionado con los requerimientos de ampliación de la Terminal de Pasajeros según exigencias específicas de demanda aeronáutica.

En algunos casos estas ampliaciones pueden generar interferencias visuales con la TWR. Un ejemplo de esta situación se evidencia en el aeropuerto de Mar del Plata, donde el techo de la terminal obstruye de manera parcial la visión de los movimientos en plataforma.



Figura 4– Zona de sombra en puesto de estacionamiento y fotografía de la Torre y la Terminal del aeropuerto de Mar del Plata.

Otro aspecto a contemplar resulta de la existencia de obras civiles en otros sectores del predio y que, por su ubicación y características, obstruyen parte de la visión desde la Torre a determinados sectores operativos del área de movimientos. Dentro de éstas pueden encontrarse hangares, antenas, edificios, e instalaciones del aeropuerto entre otras construcciones de relevancia operacional.

A modo de ejemplo se puede citar las situaciones que se dan tanto el aeropuerto de San Fernando como el de Ezeiza donde la construcción de hangares ha generado interferencias visuales por cuanto algunos sectores de plataformas y calles de rodaje no pueden ser contemplados en su totalidad.





Figura 5– Zona de sombra en plataformas y calles de rodaje Aeropuerto Internacional de San Fernando.



Figura 6– Zona de sombra en la plataforma de carga del aeropuerto Internacional de Ezeiza.

Otra problemática que se presenta está relacionada con las propias características geométricas de algunos predios aeroportuarios donde la dimensión longitudinal predomina sobre las restantes y donde el entorno condiciona los posibles desarrollos del propio aeropuerto. Esta situación conlleva, además de cuestiones de competitividad territorial, la baja disponibilidad de áreas para los desarrollos espaciales que le son propios. Un ejemplo de esta situación se da en el Aeroparque Jorge Newbery donde la Torre se ubica entre la plataforma aerocomercial, la avenida costanera y los estacionamientos vehiculares que poseen iluminación propia de alta intensidad inadecuado direccionamiento pudiendo en algunos casos interferir con la visibilidad de ciertos aspectos operativos.



Figura 7– Torre de Control entre Plataforma Comercial, estacionamiento vehicular y Avenida Costanera. Aeroparque Jorge Newbery.

## Análisis teórico

El análisis teórico se realiza mediante la utilización del software "Air Traffic Control VisibilityAnalysisTool" de la FAA (Federal Aviation Administration) [1]. El cual permite trabajar con distintas variables asociadas a condiciones de visibilidad, condiciones climáticas, elevación de la Torre y del terreno; así como también sobre la aeronave crítica considerada.

En relación a ello, este trabajo contempla:

- Nivel de luminosidad: día claro
- Rango de visibilidad: 10 millas
- Turbulencia en tierra: medio
- Aeronave crítica: Learjet 60

En ese contexto, se introducen al programa las características particulares de cada aeropuerto según los siguientes datos:

- Elevación de la Torre de Control.
- Elevación de cada Cabecera.
- Distancia de cada cabecera a Torre.
- Distancia de Plataformas a Torre.

De esta manera se puede determinar la capacidad de observación de la misma a partir de los siguientes criterios:

Capacidad de Observación	Descripción	Probabilidad vista frontal Criterio mínimo
<b>Detección</b>	<i>Habilidad para notar la presencia de un objeto en la superficie del aeropuerto independiente de la clase, tipo o modelo (por ej. Un objeto como una aeronave o un vehículo). El observador conoce que algo está presente pero no lo reconoce o identifica el objeto</i>	95,50%
<b>Reconocimiento</b>	<i>Habilidad para discriminar una clase de objeto (por ej. una clase de aeronave como un monomotor de aviación general).</i>	11,50%
<b>Identificación</b>	<i>Habilidad para especificar el objeto (por ejemplo Cessna 172)</i>	0,91%
<b>Angulo de Incidencia de Línea de Visión (LOS)</b>	<i>La distancia desde la localización de la Torre de Control hasta los puntos críticos de los aeropuertos y la altura de la cabina de la Torre de Control debería satisfacer los requerimientos de visión a objetos en el área de movimiento de las aeronaves y otras zonas asociadas.</i>	0,8 grados

Tabla 2– Criterio de capacidad de observación del software Air Traffic Control VisibilityAnalysisTool.

Contemplando entonces las Torres de Control en función de su altura surge la siguiente figura.



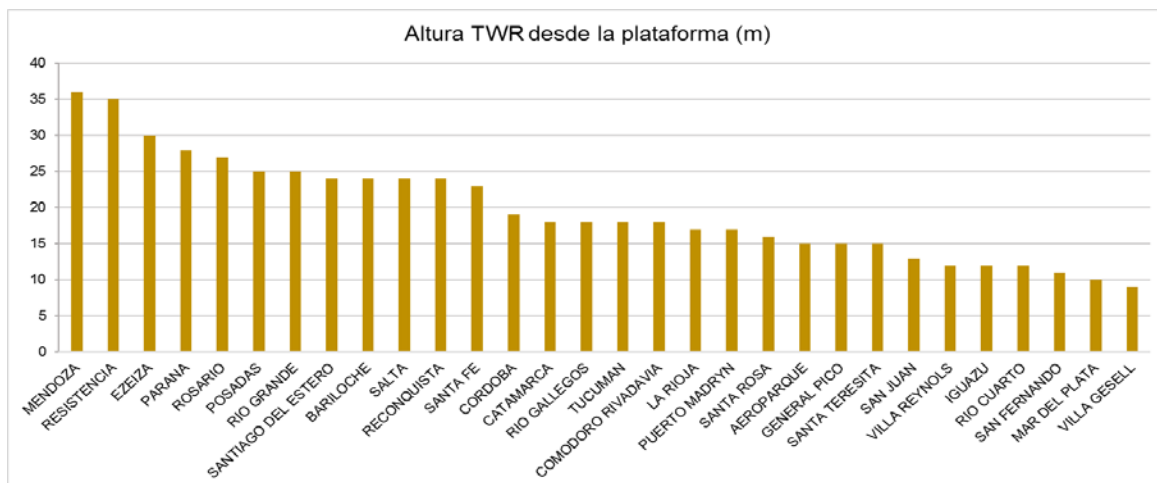


Figura 8 – Alturas en metros de las Torres de Control de los aeropuertos relevados.

De acuerdo a lo expuesto surge, del estudio teórico, que todas las Torres de Control estudiadas no poseen problemas de detección, reconocimiento ni identificación. Solo algunas problemáticas relacionadas con el ángulo de incidencia en la línea de visión. Cabe destacar que los aeropuertos de Ezeiza, Río Cuarto, Salta y Reconquista poseen dos sistemas de pistas operativas, y el análisis se realiza, por lo tanto, para cada cabecera. De esta manera, los resultados cuantificados se presentan en los siguientes gráficos.

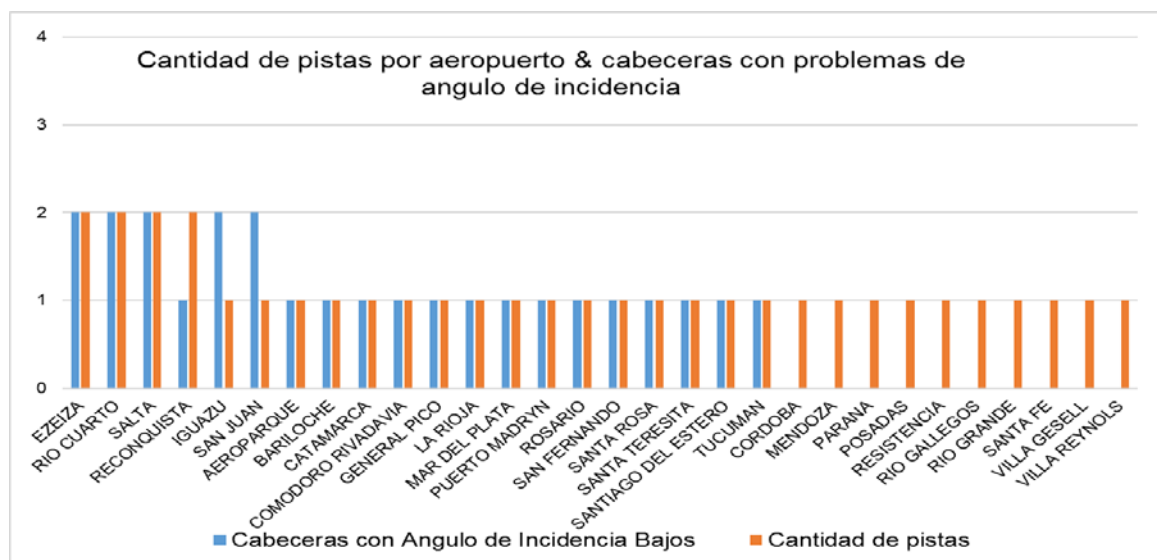


Figura 9– Cantidad de pistas por aeropuerto y cabeceras con problema de ángulo de incidencia.

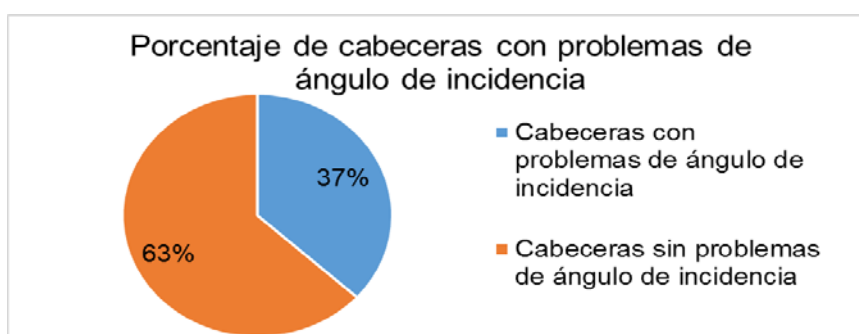


Figura 10– Porcentaje de cabeceras con problema y si problema.

## Análisis integrado

Los datos obtenidos en los relevamientos de campo se analizan integradamente con aquellos que resultan del estudio teórico a los efectos de determinar discrepancias y problemáticas específicas de cada Torre de Control para luego definir las posibles mejoras a implementar.

De este análisis surge que 20 TWR presentan resultados compatibles entre los estudios teóricos y los del relevamiento. Por otro lado, 9 Torres poseen problemas según el software pero no así en el relevamiento de campo. Finalmente, se observa que una Torre presenta problemas según relevamiento de campo pero no según el software específico.

Un gráfico representativo de esta situación se muestra a continuación:

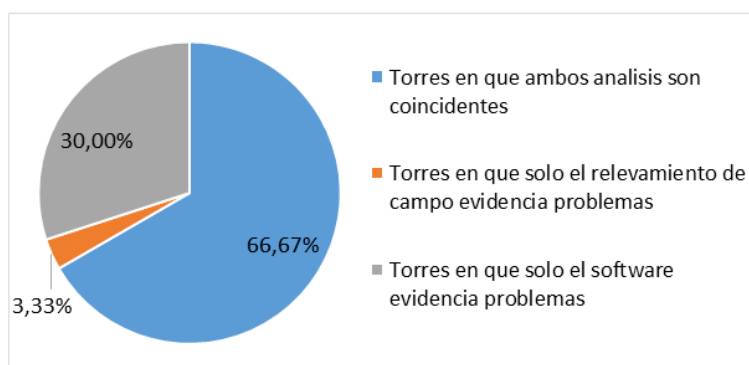


Figura 11– Porcentaje de análisis conjunto.

## CONCLUSIONES

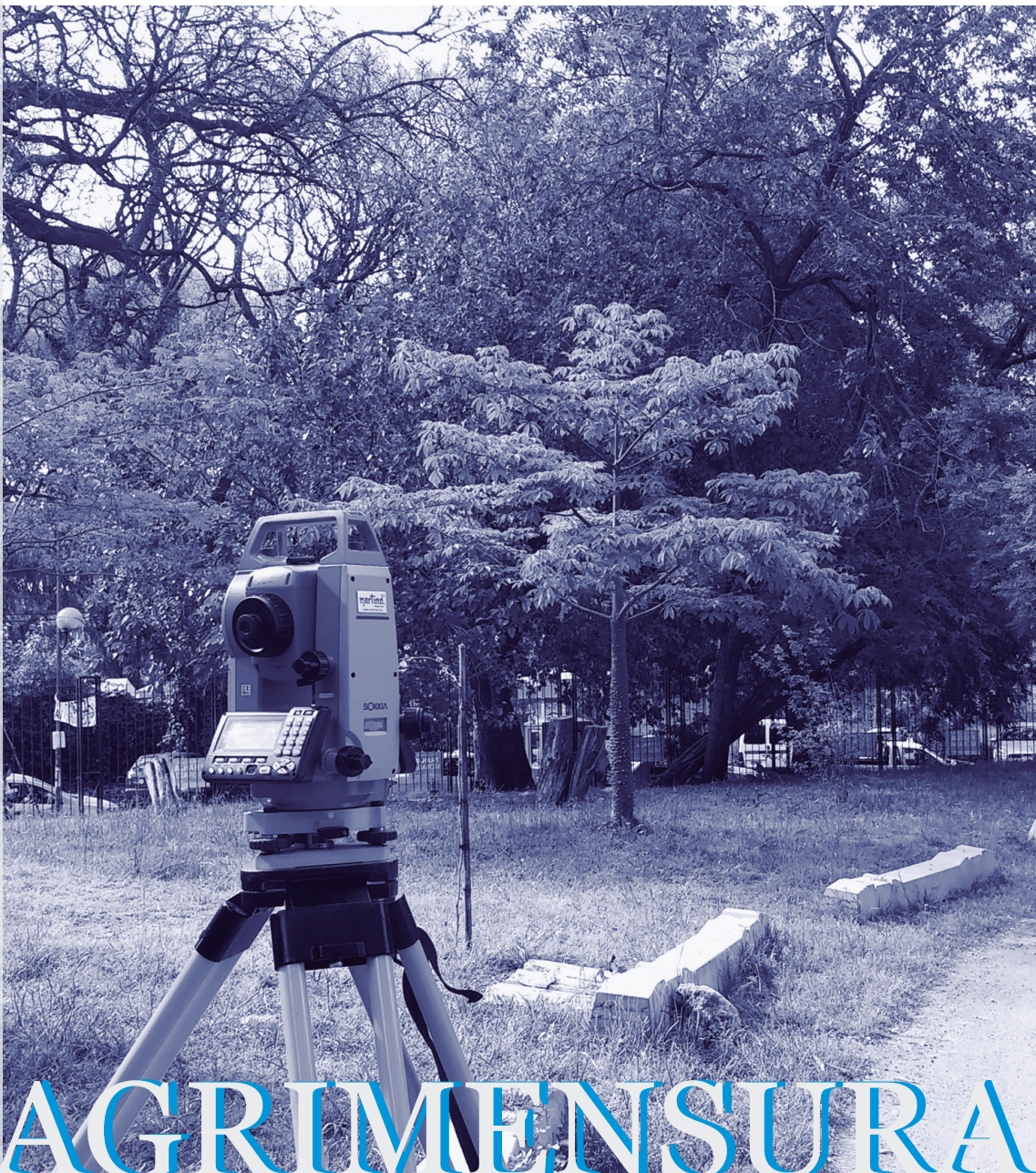
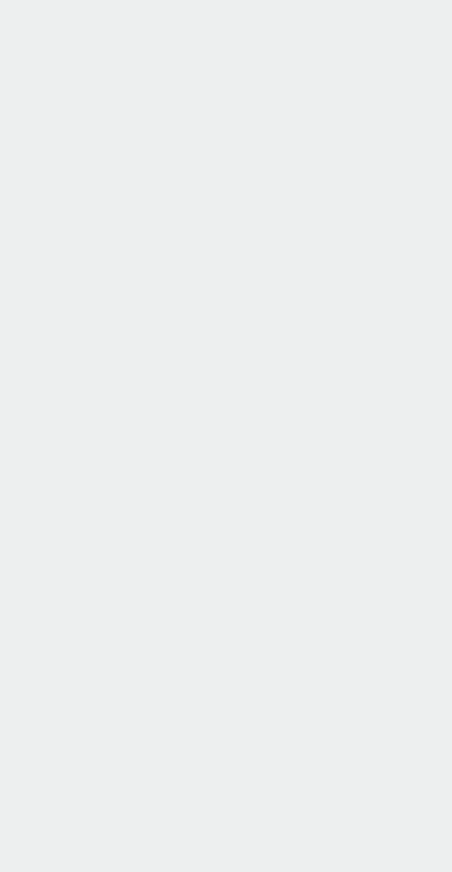
La primera conclusión a la que se puede arribar es, la importancia de poder contrastar resultados teóricos con resultados prácticos, y por ende, la importancia del relevamiento de campo, ya que si bien el software permite realizar un análisis teórico, no contempla la totalidad de las problemáticas específicas que cada aeropuerto presenta.

La combinación de ambos estudios permite realizar optimizaciones de emplazamiento y/o altura de la TWR en el predio aeroportuario, reflejadas éstas en el correspondiente plan maestro aeroportuario. Un ejemplo de ello se presenta en los aeropuertos de Ezeiza y Aeroparque donde actualmente se desarrollan nuevas Torres de Control con mayor altura y mejor emplazamiento con el fin de mejorar la visibilidad de sus respectivas áreas de movimientos.

## REFERENCIAS

- [1] Software Air Traffic Control Visibility Analysis Tool – Federal Aviation Administration.
- [2] Airport Obstructions Standards Committee (AOSC) Decision Document #05
- [3] Federal Aviation Administration (2006). Airport Traffic Control Tower Siting Order, (U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration Technical Report # 6480.4a). Washington D.C.: U.S. Department of Transportation.
- [4] Manual de servicios de aeropuertos. Doc. 9137. Organización de Aviación Civil Internacional.
- [5] Manual de diseño de aeródromos Doc. 9157 Organización de Aviación Civil Internacional
- [6] Manual de planificación de aeropuertos Doc. 9184 Organización de Aviación Civil Internacional





# AGRIMENSURA



## MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (D.E.M.) ÁREA SIERRA EL GIGANTE (SAN LUIS), DENSIFICACIÓN A PARTIR DE DATOS DE RESTITUCIÓN AEROFOTOGRAMÉTRICA.

Dr. Jorge Sisti, Agrim. Leandro Soto

UID-SIG / Agrimensura, Calle 47 esq. 116 (1900) La Plata. [jsisti@ing.unlp.edu.ar](mailto:jsisti@ing.unlp.edu.ar)  
[sotoleandro@gmail.com](mailto:sotoleandro@gmail.com)

Palabras clave: DEM / modelo elevaciones del terreno, interpolación, restitución fotogramétrica, densificación datos.

### INTRODUCCIÓN

Los modelos de elevaciones del terreno en formato digital son un requerimiento habitual para diferentes tipos de exploraciones y explotaciones, por ejemplo las mineras, así como para proyectos de ingeniería. Los modos de obtención actuales son variados, prevaleciendo para áreas extensas los basados en imágenes satelitales estereoscópicas con tratamiento fotogramétrico “convencional”, mientras que para áreas reducidas tienden a ser utilizados drones con cámaras especiales que permiten con software especializado obtener con procesos *multi-estereoscópicos* buenos resultados.

Sobre una amplia zona de más de 13.000 Ha (130 km<sup>2</sup>) se disponían en soporte digital datos 2D y 3D provenientes de un relevamiento aerofotogramétrico, útiles para producir un DEM de buena precisión. La solución actual de imágenes satelitales no hubiera podido alcanzar las mismas precisiones, teniendo además costos altos y tiempos de procesos prolongados. Parta tener un pauta de comparación: el I.G.N. produce modelos fotogramétricos digitales (los de mayor calidad del país actualmente) a partir de imágenes con 20 cm de resolución espacial, siendo el producto DEM habitual grillas de 7m x 7m y con ajustes en altimetría menores que 1 m (han sido verificados con controles de campo ajustes en altimetría del orden de 70 cm).

El área de trabajo se sitúa en el norte de la provincia de San Luis, y se observa en la imagen satelital ampliada sobre la zona, el relieve predominantemente

“rugoso” de la zona de interés en la zona de sierra El Gigante. El sector nor-este es menos variado en cuanto a topografía; hay un colector fluvial principal que escurre de este a oeste, se observa en color blanco por ausencia de agua en superficie (“rio seco”); observándose en la zona central de sierras en colores celestes zonas de extracción minera (canteras).



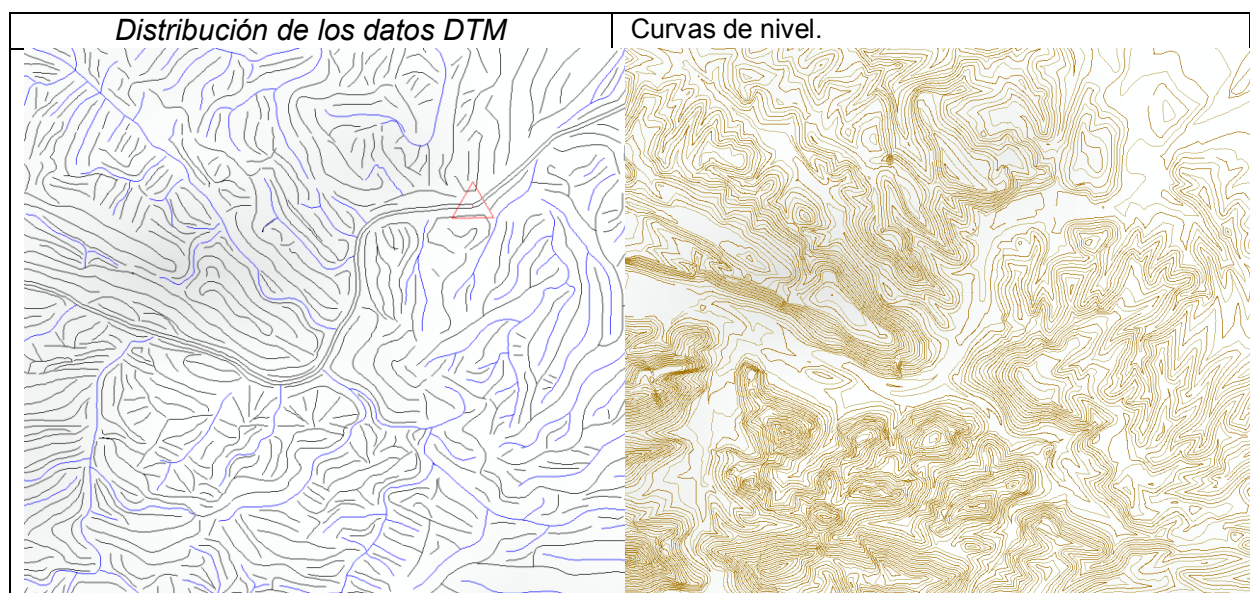
## PARTE EXPERIMENTAL

El conocimiento de los medios tecnológicos disponibles para acceder al producto de interés, Modelo Digital del Elevaciones (“DEM”, por su sigla en inglés) con las precisiones esperadas, sumado al conocimiento de los datos disponibles, permitieron seleccionar como solución técnica la densificación de la restitución fotogramétrica realizada a partir de un vuelo fotogramétrico de 1998, por sobre otras alternativas actuales: a) Restitución estereoscópicas de imágenes satelitales; b) Relevamiento con drones fotogramétricos. La primera alternativa (imágenes satelitales) requiere adquisición de al menos dos nuevas imágenes de alta resolución (aprox. 50 cm), y su procesamiento posterior. Los plazos estimados no bajaban de los 60 días, con precisiones altimétricas que difícilmente pudieran mejorar 3 a 5 m. La alternativa *dron* permitía esperar precisiones plani-altimétricas superiores (pocos decímetros), pero los plazos y costos para un área tan extendida eran imprevisibles ya que no hay antecedentes exitosos en el país para un área tan extensa y “movidá”, tanto por razones operativas como económicas. Como se mencionó anteriormente la mejor tecnología del país para grandes superficies y productos de calidad controlada la está utilizando el IGN, con relevamientos programados, que no incluyen ésta región geográfica por el momento.

Por otra parte, el conocimiento de los datos existentes, su modalidad de captura y métodos de producción, sumado al conocimiento in situ de la zona, permitieron resolver que la mejor opción con buenos resultados compatibles con los requerimientos, era la densificación de los datos provenientes de restitución fotogramétrica, aún a sabiendas que en las zonas de canteras especialmente, mostrarían información desactualizada.

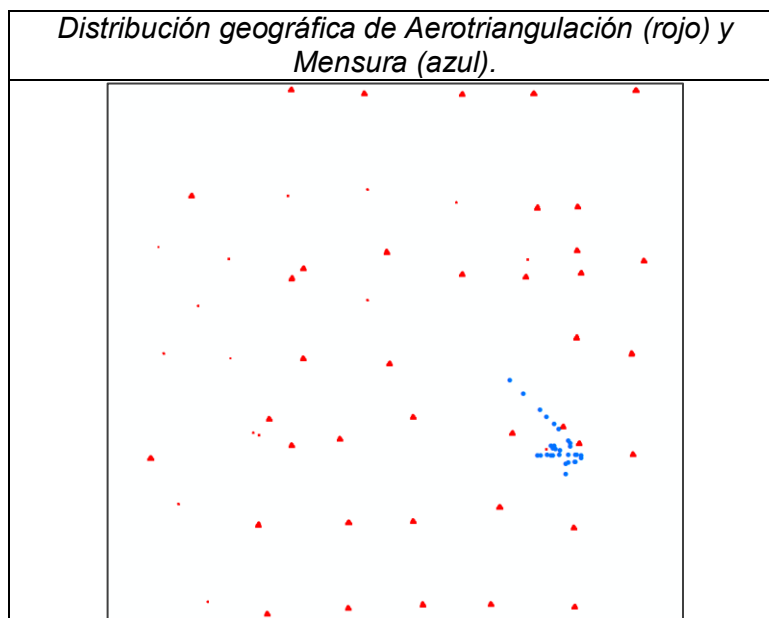
- **Datos Disponibles:**

**A)** Archivos de AutoCAD con vectores georreferenciados en coordenadas cartográficas Gauss Krüger faja 3, sistema Campo Inchauspe (sistema o datum vigente en el país a la fecha de ejecución del relevamiento). En figuras abajo se muestra la distribución de los datos 3 D (breaklines/drenaje) y los datos 2D (curvas de nivel) disponibles.



**B)** B.1, archivo de AutoCAD con puntos 3D, provenientes de la aerotriangulación utilizada para generar la restitución; B.2, listado excel de coordenadas de coordenadas plani-altimétricas correspondientes a una mensura realizada con técnicas DGPS dentro de la zona de interés en un área relativamente reducida. Las

coord. planimétricas todas en el mismo sistema referido en A, con decimales; las coordenadas altimétricas en sistema altimétrico cotas IGM/IGN; las indicadas en B.2, expresadas al metro (sin decimales).



Para realizar la densificación del DEM con criterios que respeten la descripción del terreno, se resolvió utilizar como *input* solamente el archivo 3 D (breaklines/drenaje), descartándose utilizar las curvas de nivel. Tanto los datos puntuales de aerotriangulación, mensura DGPS, como curvas de nivel, se utilizarían para control de calidad del producto final. Los puntos dato utilizados fueron más de 600.000, lo que permite estimar una disponibilidad de 46 pto./ha., aunque la distribución no es homogénea.

Para la generación de los datos nuevos, se realizó control sobre el ingreso de los datos, la densidad de puntos razonable y representativa del paisaje (muy “rugoso” o movido), el peso a otorgar a los puntos datos y los algoritmos de interpolación.

Se definió un espaciamiento de 5m x 5m (dando origen a 6 millones de puntos, una densidad 10 veces superior a la disponible al comenzar, ahora con mayor homogeneidad).

Conociendo los datos origen y las metodologías empleadas, la confiabilidad altimétrica del resultado pudo estimarse cercana a los 1,5 m en la mayoría de los casos, con apartamientos puntuales que no superaran 3 veces ese valor.

- **Procesos**

En primera instancia se recortó el archivo vectorial 3D al área de interés. Sobre dicha área se generó una grilla regular de puntos con espaciamiento 5 m. El trabajo de densificación del DEM consistió esencialmente en asignarle una cota a cada punto, en base a los datos disponibles. El método de interpolación seleccionado utilizó los criterios TIN (algoritmos de redes irregulares de triángulos) y ANUDEM, método de interpolación diseñado específicamente para crear modelos digitales de elevación “hidrológicamente correctos”; adicionalmente, se aplicó un criterio *buffer* que contempló que si el nuevo punto de la grilla estaba dentro de un entorno de 1m de un punto dato, se le asignó dicha cota (sin interpolar).

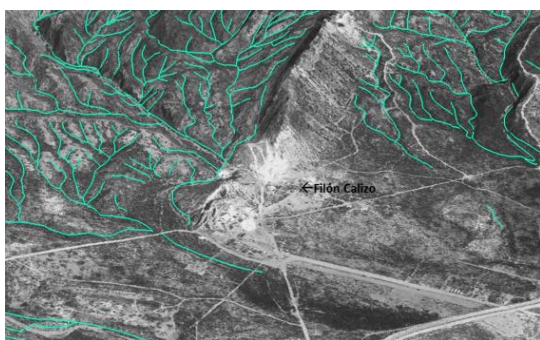
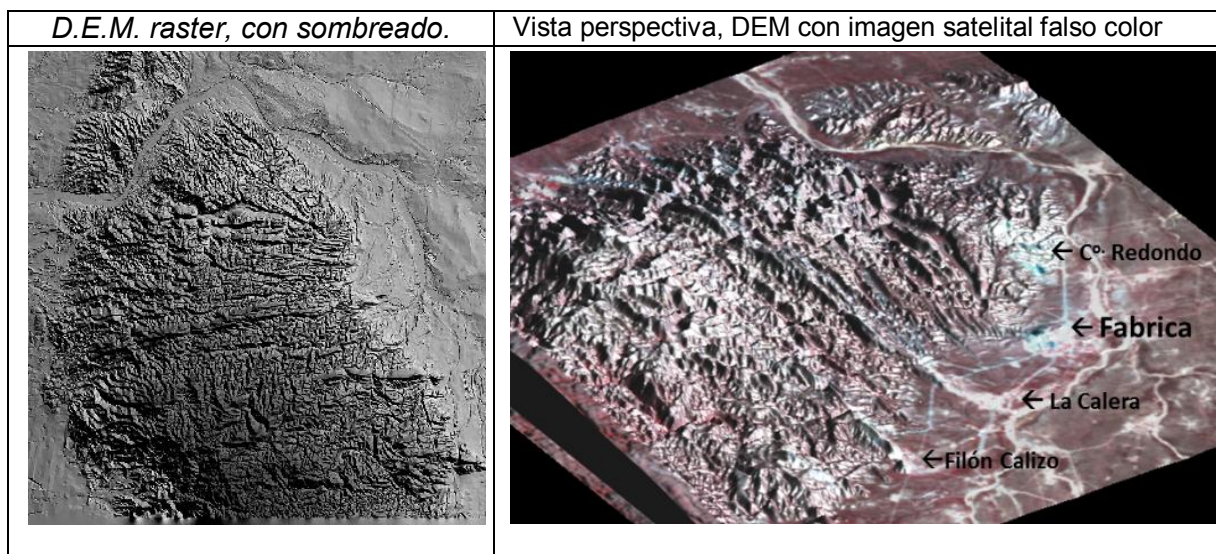
Por otra parte, dado que actualmente se está utilizando otro datum cartográfico en la cartografía oficial (Posgar 2007, referido también como WGS’84), los archivos digitales fueron re-proyectados en coordenadas cartográficas Gauss Krüger faja 3 en éste sistema.



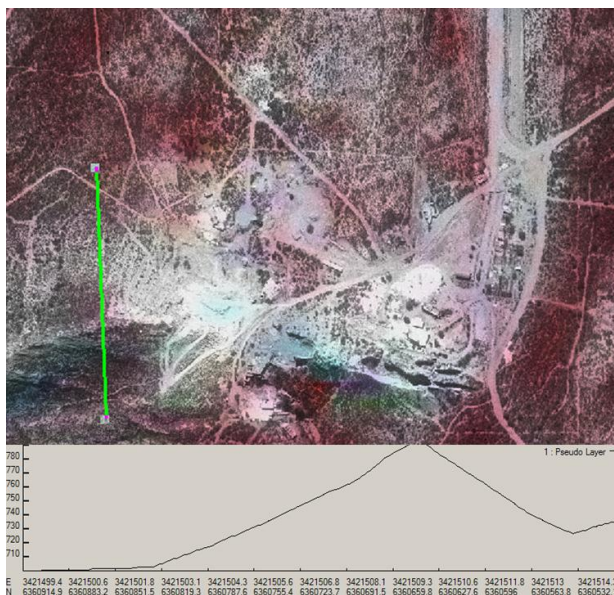
• **Productos**

Los productos del trabajo fueron:

- 1) 1.a: DEM en formato de texto (.txt), éste archivo tuvo un peso de más de 200 Mb.; 1.b: DEM formato AutoCAD en cuatro cuadrantes; en la proyección cartográfica arriba referida, en dos sistemas de referencia (Campo Inchauspe 1969 y Posgar 2007).
- 2) Subproductos: 2.a: DEM en format raster (como imagen georreferenciada) con resolución 2m; DEM formato GIS (.shp); Vistas Perspectivas (utilizando DEM, imagen satelital y ortofoto). 2.b: accesorios (no vinculados al DEM): Ortofoto1998, Imagen satelital Landsat 8 (OLI) 21agosto2016



Perspectiva con DEM, ortofoto y vectores restitución fotogramétrica.



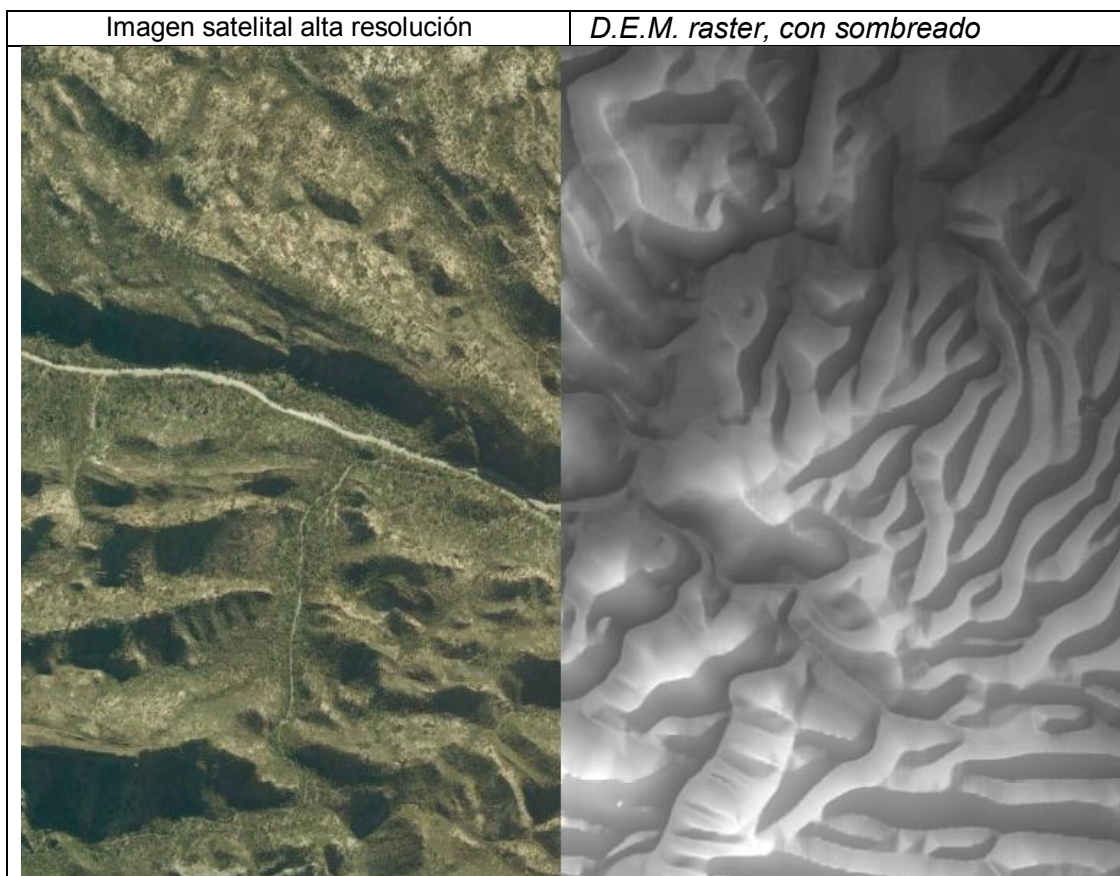
Perfil transversal (vector verde sobre imagen satelital), con su representación gráfica y sus coordenadas plani-  
altimétricas. ----->

• **Controles de calidad.**

De acuerdo a la expectativa de precisiones alcanzables con el producto, fueron contrastadas las cotas de los valores absolutos de los nuevos puntos acotados con dos fuentes diferentes (puntos que no fueron incluidos como datos para generar el producto): 1) los puntos aerotriangulados, distribuidos sobre toda la zona de trabajo y en buena cantidad, provenientes del trabajo que dio origen a los datos, y 2) datos de mensura DGPS plani-  
altimétricos, en una superficie reducida dentro del área de interés.

Los resultados del control dieron que más de 2/3 de los puntos de control aerotriangulados tenían menos de 1 m de error, teniendo los restantes diferencias acotadas, explicables por diferentes causas; los puntos de control de mensura, con cota al metro (sin decimales), arrojaron mas del 90% diferencias menores a 1 m.

Controles adicionales: se generaron nuevas curvas de nivel y se compararon con las disponibles, encontrándose muy escasos y pequeños apartamientos, explicables totalmente por la morfología del terreno y los procesos realizados; por otra parte, al modelo altimétrico raster se lo superpuso con imagen satelital de alta resolución (fuente: web), por interpretación visual se correlacionó totalmente la geomorfología “digital” con el paisaje analizado en la imagen.



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La densificación de datos de la restitución fotogramétrica existente proveyó en éste caso, datos de excelente calidad (superaron las expectativas iniciales). La decisión de utilizar ésta fuente está íntimamente relacionado con el ejercicio de la ingeniería: proveer la mejor solución entre las variables disponibles, basadas en un profundo conocimiento técnico /tecnológico.

Los D.E.M. son actualmente un producto cada vez mas conocido y por ello demandado. El conocimiento de los métodos del producción asociado a las precisiones esperables, plazos y costos, es inherente principalmente especialistas que además de la creación, manipulación y formateo de los datos, tengan profundos conocimientos de interpretación de imágenes, fotogrametría, teledetección, cartografía y geodesia. Por otra parte, los productos que se entregan deben tener un adecuado control de calidad, y convenientemente un profesional responsable.

## CONCLUSIONES

La cartografía del territorio constituye el primer elemento de consulta para cualquier proyecto de ingeniería, explotación de recursos, o aun para conocimiento del mismo para cualquier acto que involucre la administración de recursos naturales.

La cartografía digital, cada vez más expandida sobre todo desde la aparición en los últimos años en la web diversas fuentes (p.e. *Google Earth*, *Bing*, *WMS*, etc) no pose de suyo la calidad asociada a la cartografía oficial producidas por organismos o instituciones específicas.

Los DEM son un complemento imprescindible para cualquier utilización que implique el conocimiento de la morfología terrestre con buena precisión. El método de producción del DEM mas adecuado deberá ser compatible con el uso posterior de los datos y las precisiones requeridas en cada caso, las que deben estar corroboradas por controles de calidad profesionales.



## ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ERROR CÍCLICO EN EL DISEÑO DE BASES DE CALIBRACIÓN PARA DISTANCIÓMETROS ELECTRO-ÓPTICOS.

José Romano<sup>1</sup>, Pablo Paús<sup>1</sup>, Javier Bergamini<sup>2</sup>, Roberto Aldasoro<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería - UNLP. Departamento de Agrimensura - Facultad de Ingeniería - UNLP - Calle 47 y 116 – La Plata (1900) - [jose.romano@ing.unlp.edu.ar](mailto:jose.romano@ing.unlp.edu.ar)

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - UNLP

Palabras Claves: M.E.D. - error de ciclo - base de calibración.

### INTRODUCCIÓN

Actualmente se encuentra ampliamente difundido el uso de instrumentos M.E.D. (Medición Electro-Óptica de Distancias) para todo tipo de labores que requieran la medición de distancias. Estos dispositivos emiten una señal electromagnética desde un extremo de una línea a medir hacia el otro, la que regresa al punto inicial luego de ser reflejada; de la observación y procesamiento de la señal recibida surge la medida de la distancia. Con el fin de garantizar la calidad de los resultados y la trazabilidad de las mediciones, es necesario, entre otros aspectos, contar con instrumentos calibrados. El objetivo de este trabajo es analizar y seleccionar un diseño de **base de calibración**, funcional al mayor número de dispositivos M.E.D. Para poder calibrar un instrumento es necesario determinar los errores sistemáticos y la incertidumbre de medida, a partir de la medición de distancias conocidas, materializadas mediante una serie de pilares fijos alineados en el terreno. Para ello se demostrará la conveniencia de un diseño de base en particular y se generaron distintos mecanismos para su análisis pormenorizado.

### DISEÑO EXPERIMENTAL DE UNA BASE. ANÁLISIS DE ERRORES

#### Línea Base de Calibración para Instrumentos M.E.D.

Una base de calibración implica una alineación de pilares, fijos en el terreno, y dispuestos de modo que las distancias entre ellos obedezcan a un patrón de diseño determinado. Sobre estos pilares mediante bases nivelantes "Tribrach" se colocan los Distanciómetros y sus respectivos reflectores a calibrar. Existen diversos diseños de Base: Aarau, Hobart y Heerbrugg.

Una característica específica de los distanciómetros basados en el método de la diferencia de fase es la **unidad de medida (U)**. Ésta es la medida de referencia que emplea el instrumento al realizar una observación, y depende de la longitud de la onda medidora que emite, (un valor típico es 10 m). La base de calibración se diseña para un valor de **U** específico. Si este valor es seleccionado adecuadamente, la base diseñada será apta para equipos con valores diversos de **U**.

#### Errores Sistemáticos en la Medición con Instrumentos M.E.D.

Un instrumento M.E.D. tiene tres errores sistemáticos a considerar y que son fundamentales en el diseño de las diferentes bases de calibración existentes. La operación de calibrar un Distanciómetro M.E.D. implica la determinación de las magnitudes de esos tres errores conjuntamente con sus incertidumbres, en el instrumento con un reflector dado.

a) "**Error de offset**", este error tiene un valor constante para un distanciómetro y un reflector en particular, su existencia se debe a dos causas:

- El cero del distanciómetro, origen para la medición de distancias, no coincide con el centro geométrico del instrumento.

- Dentro del reflector la señal realiza un recorrido, debido al índice de refracción del prisma (Distinto al del aire), se producirá una variación de fase  $\Delta\phi$ , que involucrará en el cálculo de la distancia un recorrido adicional  $d_R$ .

b) Otro de los errores sistemáticos es el “**Error de Escala**”. Su causa radica en que el instrumento produce una frecuencia distinta a la de diseño, con lo cual la unidad de medida teórica  $U$  es diferente a la real, el resultado es que la distancia medida tendrá un error que ha de ser proporcional a su longitud, de ahí la naturaleza escalar del error. Las causas principales son efectos internos: oscilador, diodos emisor y receptor.

c) El tercero de los errores que condicionan el diseño de una base de calibración para distanciómetros es el llamado “**Error de Ciclo o Periódico**”.

Sobre el **estudio de la influencia de este último error en el diseño de bases de calibración para instrumental M.E.D.** se centra este trabajo.

### **Error de Ciclo o Periódico. Adopción de un diseño de base**

Los instrumentos M.E.D. basados en el principio de medición de fase, pueden presentar errores periódicos con longitudes de onda equivalentes a la unidad de medición  $U$ . Los errores periódicos, que se repiten en múltiplos de la unidad de longitud  $U$ , pueden darse debido a la diafonía eléctrica u óptica (feedthrough) o debido a un error sistemático en el sistema de medición de fase. Errores de este tipo con longitud de onda  $U$  son llamados errores periódicos (o de ciclo) cortos de primer orden.

De los modelos de diseño de bases de calibración para instrumentos M.E.D. se adopta el diseño de Heerbrugg. Esta elección se realizó a partir de las siguientes consideraciones:

- **Independencia en la determinación de los errores sistemáticos:** El diseño de Heerbrugg para bases de calibración permite independizar el tratamiento del error de ciclo de los errores de constante y de escala. Dependiendo del método de cálculo elegido, el error de ciclo puede minimizarse, de modo que su influencia no afecte al cálculo de los otros dos errores; alternativamente, proponiendo un modelo matemático distinto, se puede determinar el error de ciclo.

- **Adaptabilidad a instrumentos con diferentes unidades de medida  $U$ :** En este aspecto los diseños de Heerbrugg y Aarau tienen mayores ventajas sobre el diseño de Hobart. Este último requiere un pilar específico para cada valor de unidad de medida, mientras que los dos primeros tipos de base se adaptan para múltiples valores.

- **Número de observaciones:** El método de Hobart provee menor número de observaciones, lo que reduce la precisión de los parámetros determinados, en comparación con los otros dos diseños.

- **Determinación conjunta de los parámetros de calibración:** Los diseños de Heerbrugg y Hobart permiten determinar en un mismo programa de observaciones los parámetros de calibración. El diseño de Aarau requiere de un proceso adicional e independiente para determinar el error de ciclo, como por ejemplo el uso de una “base corta” de longitud  $U$ . Si bien esto no va en desmedro de la precisión del último diseño, implica costos de instalación adicionales y mayor trabajo, tanto en las mediciones como en el cálculo.

- **Oficialización del diseño de Heerbrugg:** El diseño de Heerbrugg ha sido adoptado por las normas de calidad internacional ISO. La norma ISO 17.123-4 “Electro-optical distance meters (EDM instruments)” establece un procedimiento completo para la verificación de instrumentos M.E.D. siguiendo este diseño de línea de base.

Una vez definido el tipo de diseño para la base de calibración, se estudió como inciden en ésta, factores como la unidad de medida de los instrumentos, la longitud total de la base y el número de pilares proyectados. También se analizó el modo en que intervienen la detección y cuantificación de los errores instrumentales en el diseño de Heerbrugg, es decir, como interviene cada uno de los errores en las diferentes instancias del diseño de la base.

**Estudio de la adaptabilidad de un diseño de Base, adiferentes dispositivos M.E.D.**

Un dispositivo M.E.D., para medir una distancia determina un número entero de unidades de medida más una fracción de ésta, denominada resto. Los valores que toman los restos dependen tanto de las distancias observadas como del valor de la unidad de medida **U** del instrumento. Para la minimización o determinación del error de ciclo, la totalidad de las distancias posibles a ser medidas, deben permitir obtener una muestra de restos distribuidos uniformemente a lo largo de la unidad de medida **U** (Fig. 2). El estudio de esta característica se realizó mediante un análisis numérico, el cual se visualiza en una gráfica de la distribución de los restos para cada valor de **U**. Esta metodología permite analizar eficientemente la compatibilidad de una base diseñada para un valor de **U** específico, con equipos que funcionan con otros valores.

Las longitudes de los distintos segmentos de una línea de base construida según el diseño de Heerbrugg surgen de las ecuaciones propuestas (Rüger 1996) donde cada segmento tiene la siguiente expresión:

$$A+i.B+j.D$$

U= Unidad de medida del distanciómetro.

A= Menor distancia de la línea de base (Múltiplo de U)

B= Múltiplo de A más cercano a B<sub>0</sub>.

i, j: enteros positivos.

D: fracción de U.

C<sub>0</sub>= Longitud total deseada de la línea de base.

Donde uno de los parámetros de diseño es la Unidad de Medida **U**. Cada distancia **D<sub>i</sub>**, al momento de medirse, estará comprendida por un número entero de segmento **U** ( $n/2$ ) más un resto (**r<sub>i</sub>**):

Número de Pilares	B <sub>0</sub>	D
5	$\frac{1}{6}(C_0 - 4A - U)$	$\frac{1}{16}U$
6	$\frac{1}{10}(C_0 - 5A - U)$	$\frac{1}{25}U$
7	$\frac{1}{15}(C_0 - 6A - U)$	$\frac{1}{36}U$
8	$\frac{1}{21}(C_0 - 7A - U)$	$\frac{1}{49}U$

$$D_i = n.U + r_i$$

$$r_i = D_i - n.U$$

n: Entero positivo.

La distribución uniforme de los diferentes restos a los largo de la unidad de medida **U** se consigue mediante el diseño de Heerbrugg. La mejor distribución se logra para el valor **U** de diseño, para valores diferentes esta distribución varía. Una distribución uniforme permite, por un lado, minimizar la influencia del error de ciclo en las observaciones realizadas en la base de calibración. O por otro lado determinar la magnitud del error de ciclo, de acuerdo al cálculo que se realice.

El diseño particular de Heerbrugg permite que los **r<sub>i</sub>** del total de las distancias a medir representen una distribución equitativa dentro de la Unidad de Medida **U**. A continuación se muestra un ejemplo de este tipo de diseño (Fig. 1) donde:

U=10 m.

C<sub>0</sub>= 900 m.

Nº de observaciones: 28.

n= 8 pilares.

C= 989,99 m.





Figura1

Pueden medirse 28 distancias diferentes, con sus 28 respectivos restos:

$D_i$		$r_i$	$D_i$		$r_i$
1	60.61	0.61	15	484.89	4.89
2	202.04	2.04	16	666.73	6.73
3	424.28	4.28	17	767.75	7.75
4	686.93	6.93	18	787.95	7.95
5	868.77	8.77	19	262.65	2.65
6	969.79	9.79	20	444.49	4.49
7	989.99	9.99	21	545.51	5.51
8	141.43	1.43	22	565.71	5.71
9	363.67	3.67	23	181.84	1.84
10	626.32	6.32	24	282.86	2.86
11	808.16	8.16	25	303.06	3.06
12	909.18	9.18	26	101.02	1.02
13	929.38	9.38	27	121.22	1.22
14	222.24	2.24	28	20.20	0.20

Para evaluar la distribución de los restos  $r_i$  a lo largo de la Unidad de Medida  $U$  se grafican los valores  $r_i/U$  (Fig. 2), estos varían entre 0 y 1; se muestra además la función seno obtenida a partir de esos restos (1 equivale a  $2\pi$ ):

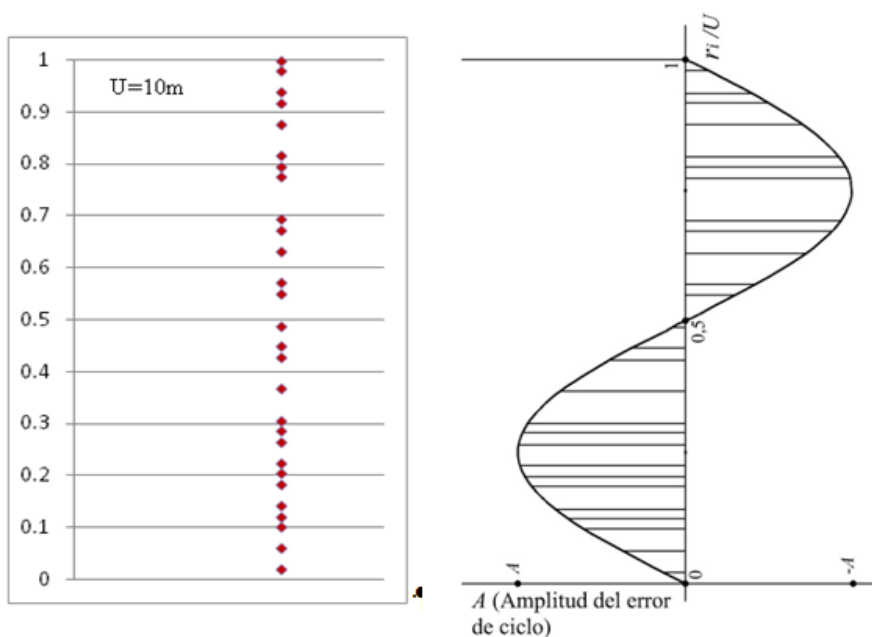


Figura 2

En el gráfico se aprecia cómo se distribuyen equitativamente los  $r_i/U$  dentro del intervalo [0; 1]. Lo que equivale a una distribución equitativa de los restos a lo largo de  $U= 10m$ . Pero no todos los distanciómetros tienen la misma Unidad de Medida  $U$ , lo más usual es 10m, pero pueden encontrarse instrumentos con unidades de medida de 2m, 5m, 7,5m, 15 m, 20m y 30,769m. Con lo cual, si bien **la base se diseña para un valor en particular, es necesario que se adapte a múltiples instrumentos con diferentes valores de Unidades de Medida  $U$** . Por ello fue que se planteó la metodología para analizar esta versatilidad de la base a partir de las gráficas de  $r_i/U$ . Si sobre un mismo gráfico se incluyen los  $r_i/U_j$  para instrumentos con diferentes valores  $U_j$  se obtiene una representación de la adaptabilidad mencionada, para un diseño de base en particular; como se verá a continuación.

**RESULTADOS**

Se presentan los resultados de dos de las bases calculadas y su adaptabilidad a diversos valores de  $U$ . Como caso de estudio se toma una distancia inicial  $C_0$  de 500 m y dos unidades de medida  $U_A=7,50$  m y  $U_B=10$  m, para cinco pilares(Fig. 3 y 4).

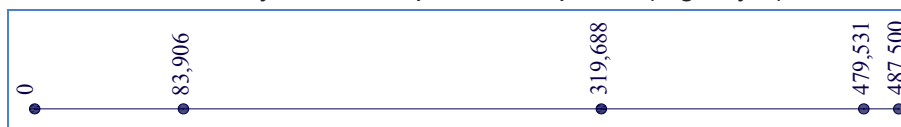


Figura3.

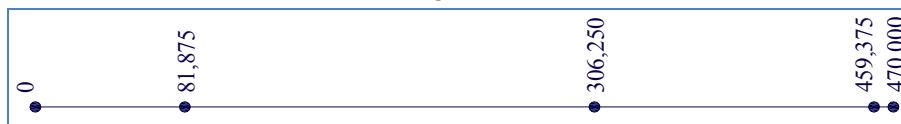


Figura4.

En los gráficos (Fig. 5 y 6) se visualiza como las bases diseñadas para valores  $U_A$  y  $U_B$  específicos se comportan con otros valores. En estos gráficos se volcaron, en el eje de las abscisas los valores de unidad de medida normalmente utilizados  $U_j$  (Incluido el valor de diseño), y en el eje de las ordenadas los cocientes  $r_{ij}/U_j$ . Donde  $r_{ij}$  es el resto obtenido al medir el segmento  $d_i$  usando una unidad de medida  $U_j$  (Instrumento con dicha unidad de medida). Cada resto  $r_{ij}$  toma valores entre 0 y  $U_j$ , por lo tanto  $r_{ij}/U_j$  varía entre 0 y 1,  $U_j$  toma los valores indicados en los gráficos. En cada base de cinco pilares podrán medirse 10 segmentos  $d_i$  de longitudes diferentes, que se distribuyen regularmente a lo largo de la longitud  $C$ .

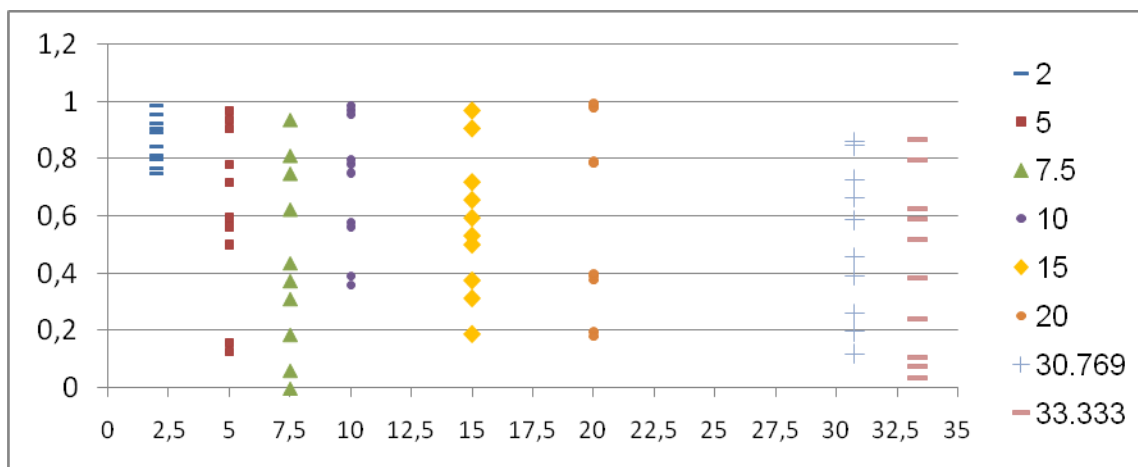


Figura5: Distribución de restos para base diseñada para  $U_A=7,50$  m

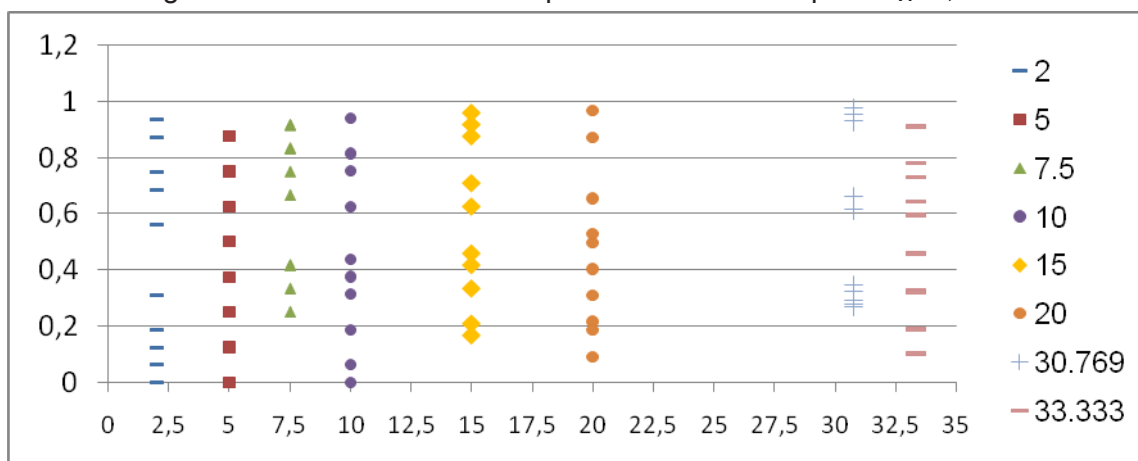


Figura 6: Distribución de restos para base diseñada para  $U_B=10$  m

En los gráficos anteriores se puede apreciar como en la base diseñada para  $U_B=10$  m los residuos se distribuyen de un modo más uniforme, en mayor cantidad de otras unidades de medida. Esto significa que la minimización o cálculo del error de ciclo en esta base se podrá realizar eficientemente, no solo para la unidad de diseño, sino para instrumentos con valores de  $U$  diferentes. Esto no se cumple para la base diseñada para  $U_A=7,50$  m, la cual permitiría el tratamiento eficiente del error de ciclo para el valor  $U$  de diseño y solo algunos pocos valores diferentes.

## CONCLUSIONES

- ❖ El análisis gráfico planteado, que permite visualizar la distribución de diferentes grupos de restos de medida para una determinada Base, demostró ser una herramienta expeditiva para este tipo de estudios. Posibilitando evaluar conjuntamente el comportamiento de instrumentos diversos en una misma base.
- ❖ El diseño para bases de calibración de Heerbrugg, comparado con otros modelos, presenta la mejor alternativa cuando se trata de determinar de modo independiente los errores sistemáticos en instrumental M.E.D. Permitiendo que a partir de un mismo programa de observaciones, puedan determinarse todos los parámetros de calibración, brindando la precisión requerida con el menor número de mediciones.
- ❖ Lo fundamental del método propuesto por este grupo de trabajo, de analizar la distribución de los  $ri/U_j$  a lo largo de la unidad de medida, es que permite establecer la funcionalidad de una base diseñada para un valor  $U$  al ser empleada con instrumentos de valor distintos. Permitiendo realizar el tratamiento del error de ciclo que sea requerido, y así garantizar la independencia en la determinación de los errores sistemáticos.
- ❖ Como parámetro de diseño, la unidad de medida de 10 metros es el valor que posibilita que una base sea utilizable por una mayor variedad de instrumentos M.E.D.

## REFERENCIAS

- J. M. Rüeger**, "Electronic Distance Measurement", 1996, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- M. Chueca Pazos, J. H. Boquera, L. B. Valero**, "Tratado de Topografía I - Teoría de Errores e Instrumentación", 1996, Paraninfo, Madrid.
- N.W.J. Hazelton**, "Instrument Calibration for the 21st Century", 2009, Paper presentado en MSPS (Minnesota Society of Professional Surveyors) 57th Annual Meeting.
- Teresa Fernández Pareja, José Manuel Quintero Echeverri**, " Proyecto de líneas base y diseño de un procedimiento de calibración de instrumentos geodésicos de medición electro-óptica de distancias en la Universidad del Quindío (Colombia) ", 2014, Revista Española de Metrología N° 7, Madrid.
- ISO 17.123-4**, Optics and optical instruments — Field procedures for testing geodetic and surveying instruments — Part 4: Electro-optical distance meters (EDM instruments).

## ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA EN LA VERIFICACIÓN DE NIVELES.

Ignacio Quinteros, Pablo Paús.

<sup>1</sup> Grupo GPSyM - Dpto. Agrimensura - Facultad de Ingeniería - UNLP.

### INTRODUCCIÓN

En el campo de las mediciones es necesario, siempre, dar alguna indicación sobre el grado de fiabilidad de un resultado. Si omitimos dar esta información las diferentes mediciones no podrán ser comparables entre sí. Es por ello que resulta necesario establecer procedimientos para evaluar y cuantificar su incertidumbre.

Dicha incertidumbre es un parámetro asociado al resultado de medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando. Esta dispersión del resultado es debida a los efectos aleatorios de la medición y a la falta de conocimiento completo de las correcciones aplicadas a los errores sistemáticos.

Teniendo en cuenta el procedimiento por el cual se debe realizar la verificación según la Norma ISO 17.123-2, para el presente trabajo el mensurando (magnitud física que se someterá a la medición) queda definido como una diferencia de alturas (desnivel), sobre el/ los cuales se determinara la verificación o no del instrumento. Y consecuentemente se informa la incertidumbre correspondiente a dicho ensayo, en base a las diferentes fuentes que intervengan, ya sean mediciones repetidas e independientes, instrumental utilizado, etc.

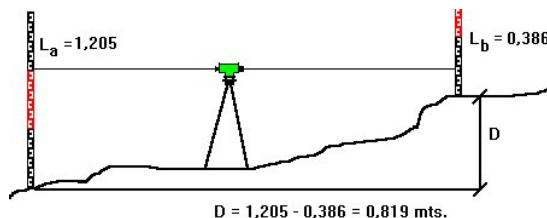
### Modelo físico

Teniendo en cuenta el instrumento que va a ser sometido a ensayo y el procedimiento que se debe aplicar en el mismo, es necesario para estudiar la incertidumbre de medida, determinar un modelo físico. Por definición el modelo físico consiste en el conjunto de suposiciones sobre el mensurando y las variables físicas relevantes para su medición. En el caso aplicado a niveles se deben considerar las siguientes suposiciones:

1. Línea de visual horizontal. Queda determinada por el instrumento a ensayar
2. Propagación en línea recta. Sin ser afectada por fenómenos que la pudieran modificar.
3. Estación. La estación del instrumento bajo ensayo se realiza cumpliendo la condición: Distancia instrumento mira = Distancia entre miras / 2
4. Miras. Las miras se encuentran ubicadas en posición vertical

### Modelo matemático

Para el cálculo de un desnivel  $\Delta H$  cualquiera se establece en primer lugar un sentido de avance, lo que origina las lecturas "atrás" y las lecturas "adelante". La diferencia matemática entre ellas da el valor del desnivel. El signo positivo o negativo del  $\Delta H$  está también asociado al sentido de avance establecido:  $L_{\text{atrás}} - L_{\text{adelante}} = \Delta H$ . Siendo  $L_{\text{atrás}}$  la lectura en la mira atrás y  $L_{\text{adelante}}$  la correspondiente lectura en la mira adelante.



De los “n” desniveles medidos resulta el valor más probable del ensayo. Con  $n = 10$ ,  $\overline{\Delta H}$  resulta de:

$$\frac{\Delta h_1 + \Delta h_2 + \Delta h_3 + \Delta h_4 + \Delta h_5 + \Delta h_6 + \Delta h_7 + \Delta h_8 + \Delta h_9 + \Delta h_{10}}{10} = \overline{\Delta H}$$

Asociado a  $\overline{\Delta H}$  y como estimador de la incertidumbre con la que se determina  $\Delta H$ , se calcula la desviación típica o desviación estándar.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \overline{\Delta H})^2}{n - 1}}$$

Donde las diferencias  $\Delta h_i - \overline{\Delta H}$  representan los desvíos de las observaciones respecto al valor más probable.

### Fuentes de incertidumbre

En primer lugar, es necesario conocer los factores por los cuales estarán afectadas las medidas a realizar. Es decir, que fuentes serán las que introduzcan la “duda” en el resultado. Dentro de las causas de incertidumbre se pueden nombrar las siguientes:

#### Propias del procedimiento de ensayo:

- *Inexistencia de perfecta equidistancia*
- *Repetibilidad*

#### Del operador:

- *Agudeza visual*

#### De la mira:

- *Calibración de la mira*
- *Verticalización de la mira*
- *Resolución*

#### Del instrumento bajo ensayo:

- *Aumento*

#### Del ambiente:

- *Temperatura*

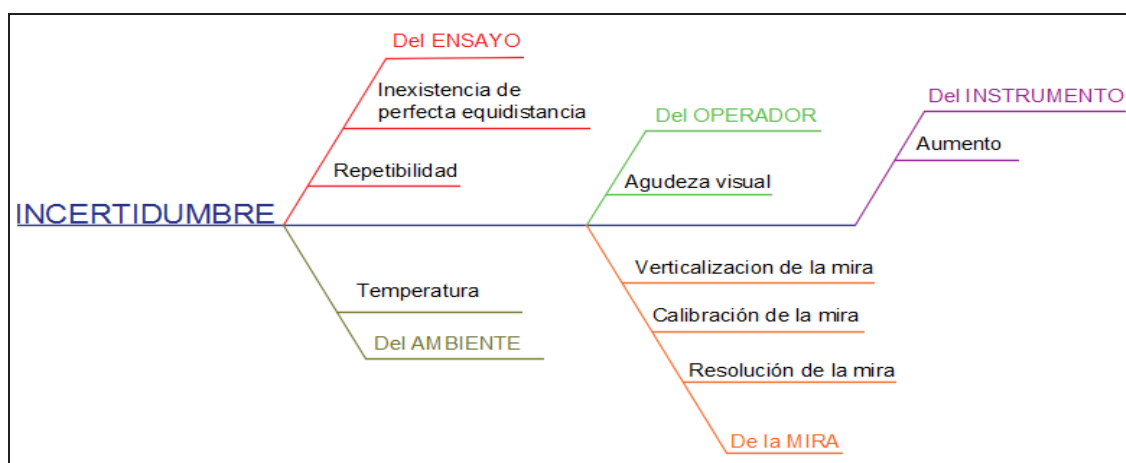


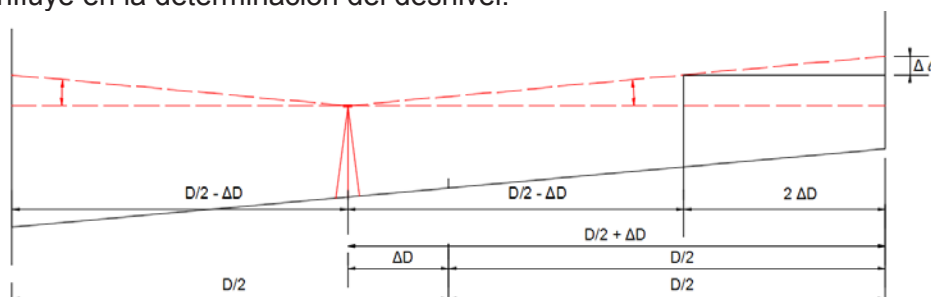
Diagrama de fuentes de incertidumbre – “Espina de pescado”

Conociendo todas estas fuentes se debe proceder a cuantificar cada una de ellas, para posteriormente llegar a la incertidumbre final de medición.

**Inexistencia de perfecta equidistancia**

Para que la influencia del error de colimación no afecte la determinación del desnivel las distancias nivel-mira (atrás) y nivel-mira (adelante) deben ser iguales (*Modelo Físico*).

En este caso se analiza una variación de magnitud  $\Delta D$  en dicha equidistancia y cómo la misma influye en la determinación del desnivel.



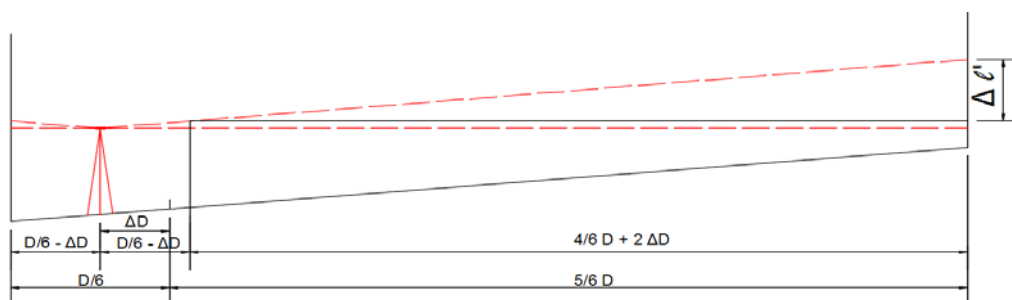
Si se supone una variación  $\Delta D$  se tendrá para una mira (atrás) una distancia  $D/2 - \Delta D$  y hacia la otra mira (adelante) tendremos una distancia  $D/2 + \Delta D$ . Teniendo en cuenta lo antedicho, se compensará la influencia del error de colimación hasta una distancia igual a  $D/2 - \Delta D$ . El tramo restante será igual a  $2\Delta D$ .

El tramo  $2\Delta D$  y el ángulo vertical  $\beta$  componen la influencia de la imperfecta equidistancia en la posición 1 del ensayo.

$$\text{tag } \beta = \frac{\Delta l}{2\Delta D}$$

$$2\Delta D \cdot \text{tag } \beta = \Delta l$$

En el caso de la posición 2 sucede lo mismo, solo que este caso la distancia en la que se compensa la influencia del error de colimación es  $D/6 - \Delta D$ , en vez de ser  $D/6$ . Se obtiene entonces sobre la mira ubicada a  $4/6 D + 2\Delta D$  una influencia  $\Delta l'$ .



$$\left(\frac{4}{6} D + 2\Delta D\right) \cdot \text{tag } \beta = \Delta l'$$

En el caso de no existir tal valor de  $\Delta D$  la expresión sería:  $\left(\frac{4}{6} D\right) \cdot \text{tag } \beta = \Delta l'^2$

Considerando los valores  $\Delta l$ ,  $\Delta l'$  y  $\Delta l'^2$  y las posiciones antes expuestas se puede realizar el siguiente análisis:

- Partiendo de la posición 2, con  $\Delta l'$ , y considerando la posición siguiente, donde  $\Delta D=0$ , se tiene que:

$$\Delta l' - \Delta l'^2 = \text{tag } \beta \cdot 2\Delta D$$

Se parte de este caso ya que en ambas posiciones es donde la influencia del error de colimación es mayor y la diferencia entre los  $\Delta l$  es "comparable". En el caso de



considerar la posición 1 los  $\Delta l$  no serían “comparables”, ya que esas diferencias de posición son las que nos darán la existencia o no del error de colimación.

Considerando una diferencia entre  $\Delta l^1$  y  $\Delta l^2$  no mayor a 0,1 mm se puede decir que el valor de  $\Delta D$  no puede ser mayor que 1 m, para un  $\beta$  del orden de los  $10''$ .

Para la verificación de niveles la distancia será medida con cinta métrica milimetrada, con lo cual se encontrará ampliamente dentro de los parámetros mencionados y la influencia de esta fuente de incertidumbre no se tendrá en cuenta.

### **Repetibilidad**

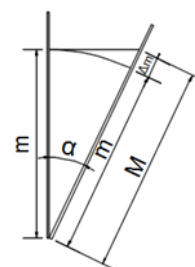
La incertidumbre proveniente de la repetibilidad se encuentra asociada directamente a la metodología de ensayo. Ya que se debe realizar la medición de un desnivel  $n$  veces ( $n=10$  – Modelo Matemático). De los cuales se obtendrá el valor más probable y sus estimadores de incertidumbre.

Con lo cual, la incertidumbre proveniente de la repetibilidad de las mediciones queda cuantificada con la varianza de la media, que representa la mejor estimación de la dispersión de los  $n$  desniveles observados.

### **Verticalización de la mira**

En este caso una inclinación de la mira de ángulo  $\alpha$  produce una lectura incorrecta  $M$ . Siendo la correcta  $m$ . Para cuantificar la influencia de esta inclinación se considera la diferencia entre los tramos  $M$  y  $m$  ( $M-m$ ) =  $\Delta m$ .

Para un valor de  $\Delta m$  inferior a 0,1 mm los valores de  $\alpha$  y  $m$  no deben ser superiores a los  $20'$  y 2,00 m respectivamente. Con lo cual esta fuente de incertidumbre se considera despreciable, ya que con cualquier nivel esférico de mercado se puede estar dentro de los  $20'$ <sup>1</sup> y un  $m=2,00$  m resulta prácticamente imposible de alcanzar por la metodología de ensayo.



### **Temperatura**

La temperatura es otra fuente de incertidumbre, ya que una variación de la temperatura produce una variación en la longitud de las miras. La incidencia de esta variación sobre el tramo de mira considerado viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta Long. = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

Dónde:  $\Delta t$  es la diferencia de temperaturas;  $\alpha$ : coeficiente de expansión térmica;  $L_0$ : longitud inicial a  $20^\circ\text{C}$ .

En este caso se tiene en cuenta la situación más desfavorable, donde ambas miras se encuentran a diferentes temperaturas.

Para asegurar una incertidumbre menor que 0,1 mm en un tramo de mira  $L_0=1\text{m}$  y miras de aluminio ( $\alpha=2,4 \times 10^{-5} [\text{mm/mm}^\circ\text{C}]$ ), la diferencia de temperatura entre miras debe ser menor que  $4^\circ\text{C}$ . Por lo tanto es necesario medir la diferencia de temperaturas con una incertidumbre menor a  $1^\circ\text{C}$ , con termómetros iguales o bien el mismo termómetro.

### **Aumento y agudeza visual**

En primer lugar se debe aclarar que la agudeza visual está relacionada con la “habilidad” de distinguir los detalles de los objetos, por ello es que es sumamente subjetiva. Frecuentemente se mide “descubriendo” la mayor distancia a la que pueden distinguir dos líneas como tales y no como una sola, quedando entonces caracterizada por un ángulo

<sup>1</sup>Una especificación estándar de niveles esféricos es del orden  $7'$  a  $10'$

mínimo de visión. En la práctica, se toma un ángulo límite medio de agudeza visual de 30" y considerando que se encuentra afectado por el aumento del antejo (**A**), dicha influencia se cuantifica como:

$$\Delta vi = \frac{30''}{A} \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot A}{100}\right)$$

Donde  $\left(1 + \frac{4 \cdot A}{100}\right)$  corresponde al factor de claridad determinado de forma empírica,<sup>II</sup> teniendo en cuenta que con un mayor aumento disminuye el ángulo de luminosidad/claridad que incide dentro del antejo y por ende dicha condición es menos favorable.

Considerando aumentos típicos de 20x y 32x para los antejos y la distancia nivel-mira, que en caso más desfavorable es de 5/6 D, con D= 35 m se tiene:

Aumento - A	$\Delta vi$ (")	$\Delta vi$ (mm)
20x	2,70"	0,4 mm
32x	2,14"	0,3 mm

De esta evaluación se pueden mencionar dos conclusiones.

- En primer lugar, la incertidumbre proveniente de la relación agudeza visual– aumento no resulta despreciable.
- La influencia de error de colimación informada en valores angulares no pueden ser inferiores a los valores antes expuestos. De ser así este apartado no se estaría teniendo en cuenta.

Vale aclarar que este apartado es válido solo para niveles ópticos, no digitales. Debido a que en el caso de niveles digitales la lectura está asociada a la resolución de la cámara CCD de cada instrumento.

### **Resolución y agudeza visual**

La resolución se encuentra directamente relacionada con la mínima división de la mira o regla, e inversamente relacionada con la apreciación visual del operador. De este modo se puede decir que "la resolución es la mínima variación de la magnitud medida que da lugar a una variación perceptible de la indicación correspondiente".<sup>III</sup>

En el caso práctico de la verificación de niveles se considera a la mínima división como 10 mm (1,00 cm) y una estimación de la quinta parte. Con lo que se tiene:

$$\Delta r = \frac{\text{Resolución}}{\sqrt{3}} \Rightarrow \Delta r = \frac{\text{mínima división}}{\text{fracción estimable}} = \frac{10 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 1,2 \text{ mm}$$

Valor que no resulta despreciable al momento de estimar la incertidumbre final. Nuevamente vale aclarar que este apartado es válido solo para niveles ópticos, no digitales.

<sup>II</sup>Topografía general y aplicada – Domínguez García Tejero

<sup>III</sup>Guía GUM - 2008

### **Calibración de las miras**

La calibración de un instrumento tiene como objeto informar con que incertidumbre mide el mismo. A esa incertidumbre intrínseca del instrumento se le debe adicionar la incertidumbre de la medición, para conocer con que incertidumbre se da un resultado.

En el caso de las miras se debe conocer con que fiabilidad, propia de las mismas, se puede realizar la lectura. Aquí radica la importancia de conocer las características de las miras con las que se realizara el ensayo.

### **Incertidumbre combinada**

El resultado final de la cuantificación de la incertidumbre es la incertidumbre combinada. Donde se expresa el resultado final de la incertidumbre proveniente de todas las fuentes. La expresión de la incertidumbre combinada resulta de la raíz de la suma de los cuadrados de todas las incertidumbres intervinientes.

$$\mu_c = \sqrt{S(\bar{q})^2 + \Delta vi^2 + \Delta r^2 + \Delta C^2}$$

$\mu_c$  = incertidumbre combinada

$S(\bar{q})^2$  = incertidumbre repetibilidad

$\Delta vi$  = incertidumbre aumento y agudeza visual

$\Delta r$  = incertidumbre resolución y agudeza visual

$\Delta C$  = incertidumbre calibración de miras

### **CONCLUSIONES**

Como conclusión del presente trabajo resulta relevante mencionar cuán importante es definir los aspectos fundamentales que hacen al desarrollo del estudio (modelo físico, modelo matemático, y fuentes de incertidumbre).

Al comienzo se mencionó la importancia de las Normas Internacionales y los procedimientos que se establecen para llegar a los resultados técnicamente válidos. Y en este cierre del trabajo es bueno destacar que para estimar la incertidumbre de medición no hay procedimientos estrictos a seguir, si bien la Guía GUM establece pautas y consideraciones a tener en cuenta, la mejor forma de realizar un estudio de este tipo es no estar sujeto a ninguna forma estricta. Es decir, estudiar e investigar con la mayor curiosidad y teniendo un campo de visión lo más amplio posible. De este modo se llegan a analizar todas las variables y luego se “filtraran” las que se crean redundantes.

Se debe realizar un trabajo de “inteligencia” para recabar toda la información disponible para la cuantificación de la incertidumbre, ya sea de productos de mercado, bibliografía relacionada con instrumental topográfico, conocimientos técnicos de funcionamiento del instrumento y la información complementaria que sea necesaria, este o no relacionada directamente con el instrumental. Esta cuantificación será la que permita decir que las mediciones sean comparables con las obtenidas en otros laboratorios de calibración.

### **BIBLIOGRAFÍA**

Guía GUM 2008

Estimación de incertidumbres; M. Mar Pérez Hernández- Centro Español de Metrología

Estimación de la incertidumbre de medida; METRYCAL

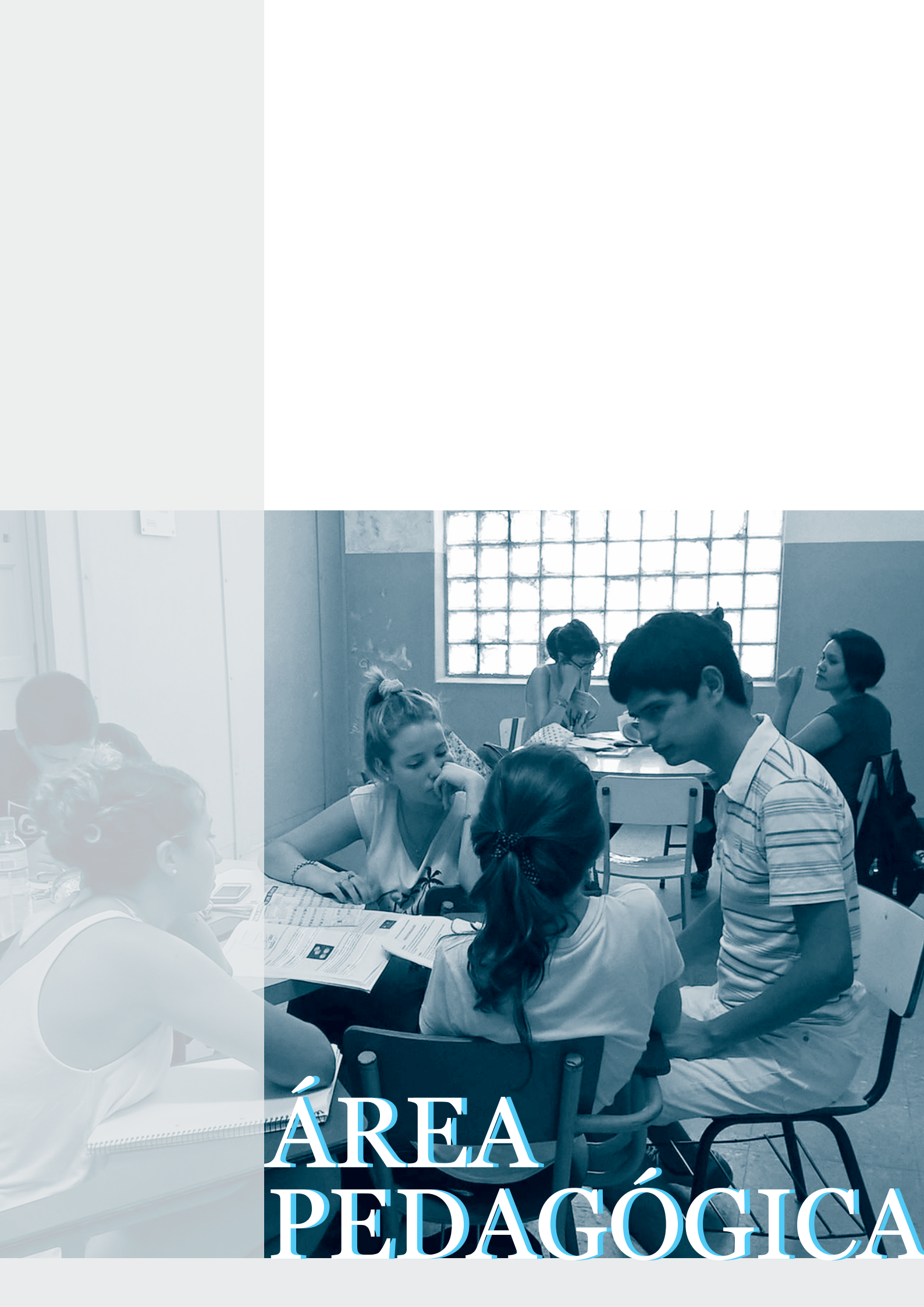
Incertidumbre de medición; Ing. Marcelo Iglesias, Ing. Flavio Piotto, Ing. Jorge Stella INTI

Metrología General; Ing. Marcelo Iglesias – INTI

Guía para estimar la incertidumbre de la medición CENAM

Topografía general y aplicada – Domínguez García Tejero

Información general de luz, visión y agudeza visual.–Trabajos de gestión metrológica en laboratorios de verificación y calibración - *Grupo GPSyM Dpto. Agrimensura - Facultad de Ingeniería – UNLP.*



# ÁREA PEDAGÓGICA



## INGENIERÍA Y TRATAMIENTO CURRICULAR DE LOS SABERES SOCIALES. UNA INDAGACIÓN EN CURSO

Abate, Stella M.; Lyons, Silvina; Lucino, Cecilia y Kang, Kyung Won

Área Pedagógica- 1 y 47 - [smabate@ing.unlp.edu.ar](mailto:smabate@ing.unlp.edu.ar)

### INTRODUCCIÓN

En este trabajo compartiremos un estado de avance sobre una investigación en curso respecto a la inclusión de saberes socio - humanísticos (SSH) en las carreras de ingeniería, durante lo que denominamos una etapa pos estándar. Se trata de un proyecto de investigación bienal en el marco del Programa de Incentivos, correspondiente al periodo 2015-2016, que se ha propuesto como continuidad o segunda parte del proyecto sobre la misma temática realizado en el periodo 2013-2014. En el marco de estas jornadas, presentaremos dos hipótesis acerca de las discusiones que -en términos curriculares- se han configurado alrededor de los saberes sociales y humanísticos en carreras de ingeniería.

Cabe señalar en primer lugar, y como lo hemos hecho en otras presentaciones sobre estos temas, que el escenario mundial nos obliga a asumir la responsabilidad que nos compete en la formación de ciudadanos para una sociedad cada vez más impactada por los fenómenos del mercado, los controles sutiles del poder político, la doble moral de las políticas macroeconómicas, la deshumanización, la pobreza y las disparidades éticas que día a día observamos; así como la inequidad y las desigualdades de todo orden (Abate et al., 2013). Las responsabilidades que los ingenieros, como cualquier otro profesional, asuman para con la sociedad en pos de un desarrollo sostenible y sustentable se vinculan a una ética profesional y, más ampliamente, al ejercicio activo de la ciudadanía.

### Planteo general y lógica del proceso de indagación

La necesidad de incluir (o visibilizar) los saberes sociales y humanísticos en los planes de estudio de estas carreras tiene sus orígenes en el año 2001, cuando el Ministerio de Educación de la Nación prescribió que las mismas debían contemplar contenidos de Ciencias Sociales y Humanidades, orientados a formar ingenieros conscientes de sus responsabilidades sociales. Esto llevó a las unidades académicas a incorporar contenidos vinculados a estas áreas de conocimiento, o bien a justificar su presencia en los planes vigentes hasta ese momento. En la actual etapa pos-estándar se está revisando la manera de incluir estos saberes en los planes de estudio de las carreras de ingeniería a partir de dos tendencias de cambio que han sido materializadas en indicadores de acreditación y lineamientos de planificación para la formación de ingenieros en el Plan Estratégico 2012-2016 del Programa de Calidad Universitaria de la Secretaría de Políticas Universitarias. Estas son: el acortamiento de la duración real de las carreras de grado y la contribución del profesional ingeniero al desarrollo territorial sostenible.

En el escenario que marcan estas tendencias y anclando en la situación curricular particular de las carreras de ingeniería de la UNLP, se ha desarrollado esta indagación de naturaleza cualitativa-hermenéutica, que se ubica en el campo del currículum y de la didáctica del nivel superior. Su propósito ha sido en sus dos periodos aportar a uno de los debates en la formación de los ingenieros: ¿qué saberes humanísticos son requeridos y posibles de ser enseñados en el actual contexto socioeducativo? ¿Qué propuestas son deseables y posibles de desarrollar intentando respetar los intereses de los alumnos y de los distintos sujetos sociales en la formación de profesionales?



En el periodo 2015-2016 se propuso continuar con el proceso iniciado en el periodo anterior, profundizando el estudio del estándar vinculado a los saberes humanísticos, visibilizando y debatiendo su origen y su vigencia desde una lógica complementaria a la lógica de la acreditación. La investigación continuó centrándose en las carreras de ingeniería de la UNLP, siendo sus fuentes de análisis principales documentos curriculares y narrativas de los sujetos que les dan sentido, así como discursos públicos que han emergido en la institución en relación a estos temas. Con respecto a esto, se realizó un seguimiento de los debates y propuestas en el proceso actual de cambio de plan de estudio, sobre el destino de los Asignaturas Humanísticas. Asimismo, durante 2015 se relevó la opinión de tutoras pares en un focusgroup y de graduados recientes que han sido tutores pares en la Facultad (recibidos de ingenieros en los últimos 10 años) a través de una encuesta semi-estructurada a distancia elaborada en soporte informático. Por otra parte, y con la finalidad de identificar puentes que favorezcan el diálogo entre las dos culturas -la humanística y la científico-tecnológica-, se realizó una entrevista semi estructurada a una referente del campo de las ciencias sociales (Historia), externa a la facultad, parte del actual equipo de gestión de la UNLP y una de las voces de las cuestiones académicas de las Universidad, y se relevaron en eventos institucionales expresiones públicas de sujetos que pertenecen a determinados grupos de interés de las Ciencias Sociales con distintas visiones respecto al rol de las mismas en el contexto actual<sup>1</sup>.

### **Hipótesis sobre el tratamiento curricular de los saberes sociales y humanísticos**

A continuación se presentan dos hipótesis elaboradas a partir del análisis de los datos relevados. Las mismas abordan problemas clásicos y actuales de la teoría curricular, considerando que ocuparse de innovar en vistas a la inclusión de saberes no técnicos en carreras universitarias constituye un problema curricular complejo, que incluye la búsqueda de instancias formativas que brinden la oportunidad a los estudiantes de abordar de manera explícita preguntas respecto a sus posicionamientos éticos y profesionales.

De esta manera, estas hipótesis se vinculan a las posibilidades de mejora en términos curriculares de los saberes sociales y humanísticos en carreras de ingeniería, en vistas a pensar una continuidad que parta del camino recorrido a la vez que aporte a la profundización de diversos perfiles profesionales que permitan pensar a la ingeniería desde una mirada amplia y comprehensiva. En este sentido, indagar sobre el lugar curricular de lo social y lo humanístico en carreras científico – tecnológicas supone relacionar esta formación con el lugar de la universidad en la configuración de la ciudadanía para el actual escenario social y educativo.

*Hipótesis 1: La continuidad de los saberes sociales y humanísticos en el curriculum de la formación de ingenieros se debate en la tensión entre la estructura tradicional y la transversalidad en la organización curricular.*

Como se anticipó en el apartado anterior y en trabajos anteriores, la inclusión de los saberes socio-humanísticos en las carreras de ingeniería respondió en primera instancia a una prescripción derivada de los procesos de acreditación y como tal fue tratada curricularmente a partir de la configuración de un pool de asignaturas variopintas que expresan distintas concepciones sobre en qué consisten estos saberes y cuál es su aporte a la formación profesional de los y las ingenieros/as. Esta manera de pensar y materializar los cambios no ha permitido contar con un campo de estructuración curricular (De Alba, 1995) explícito que diera entrada a los saberes sociales y humanísticos, lo que provocó una

---

<sup>1</sup> Panel "Desafíos de las Ciencias Sociales para la próxima década", realizado el 16 de abril de 2015 en el que participaron: Dora Barrancos (CONICET); Florencia Saintout (Decana de la Facultad de Periodismo y Comunicación Social-UNLP); Alejandra Wagner (Decana de la Facultad de Trabajo Social-UNLP) y Aníbal Viguera (Decano de la Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación- UNLP)

ausencia de referencia curricular para orientar el proceso de implementación de estos saberes, para la creación de asignaturas nuevas o para la orientación de un proceso de evaluación del camino transitado (Abate, et al., 2014). Aún así, esta gestión del cambio curricular permitió la entrada efectiva de estos saberes en el plan de estudios como asignaturas, posibilitando que la institución acredite una experiencia en la temática que opere como disparador de hipotéticas discusiones.

Actualmente y a manera de hipótesis, lo que hemos denominado como etapa pos estándar se estaría expresando en una interpelación de la institución al formato de asignatura que han tomado aquellos espacios curriculares que se crearon en respuesta a los estándares de acreditación de las carreras de ingeniería, argumentando que en el caso de las asignaturas llamadas humanísticas, parecieran no impactar en la formación de los estudiantes en alguna dirección. En el proceso de revisión de los planes de estudio circularon otros formatos alternativos. Inicialmente se habló de una propuesta de seminarios y, en este momento, parece consolidarse como espacio flexible, que le da entrada a actividades varias: eventos técnicos, visitas a obras, charlas sobre temas vinculados a la industria, etc. Pareciera que hay carreras que entienden que los contenidos socio humanísticos están subsumidos en este espacio, y otras que los consideran con una entidad curricular diferente.

Este escenario plantea por un lado una potencia de este nuevo formato para la apertura de otras voces y la creación de espacios curriculares más permeables, y por otro lado, nuevas preguntas respecto al “lugar curricular” asignado a estos saberes, preguntas que introducen una discusión que replica debates surgidos en otras épocas y niveles del sistema educativo<sup>2</sup> y que se plantea en la opción: asignatura específica o tratamiento transversal de sus temas (Cullen, 2001). Al respecto es válido preguntarnos, en sintonía con los problemas que para aquellos contextos señalaba Carlos Cullen (2001), cómo se puede garantizar en este nuevo formato la presencia de enfoques humanísticos en la formación de ingenieros (en términos de propósitos educativos y posicionamiento sobre esos temas propuestos) y qué estructura puede soportarlos (sin ser la estructura de cátedra) de manera que la formación social y humanística no se diluya en la opción de los seminarios.

De todos modos, y a pesar de esta interpelación al lugar que han adoptado estos espacios, hemos identificado en el análisis de las expresiones de los ingenieros y estudiantes entrevistados la convivencia de una heterogeneidad de perspectivas acerca de cómo aproximarnos a estos saberes, sin que la misma suponga discursos excluyentes o hegemónicos que direccionen en un único sentido estos cambios de formato. Sobre esto avanzaremos en la siguiente hipótesis.

*Hipótesis 2. Los saberes sociales y humanísticos, aunque difusos, siguen estando vigentes en las expresiones de diferentes sujetos curriculares.*

En la primera etapa de la investigación -realizada durante 2013-2014- elaboramos un mapa de visiones sobre los saberes socio-humanísticos en la FI, a partir de identificar y caracterizar argumentos de diversas perspectivas y analizar las relaciones entre ellas (Tello y Gorostiaga, 2009). Dichas perspectivas se expresaban en las voces de representantes estudiantiles, jóvenes ingenieros que han desarrollado actividad como tutores en la facultad y la voz oficial de ingenieros activos en la actual proceso de revisión del plan de estudio - sujetos curriculares en clave de lo propuesto por Alicia de Alba (1995).

De esta manera, sintetizamos este proceso en dos grupos de visiones respecto a cómo se concibe al profesional ingeniero en sintonía con cómo definen los SSH. Como afirmamos al

---

<sup>2</sup>Durante la reforma educativa de los noventa en nuestro país surgió para los niveles primario y secundario el debate respecto al lugar que debían ocupar los contenidos denominados “transversales” al curriculum, como por ejemplo, ética y ciudadanía.

finalizar el apartado anterior, estas visiones no se excluyen entre sí, y en ambas subyace la imagen del ingeniero como aquel profesional que “resuelve problemas”. Un primer grupo concibe al ingeniero como líder de la gestión de proyectos en su dimensión técnica y económica, y desde esta perspectiva tendrían más consenso de entrada al curriculum aquellos saberes no técnicos que se relacionan con las demandas de empresas, tales como el conocimiento de aspectos legales y económicos, escritura técnica, idiomas, el “manejo” de personal a cargo o el saber dialogar con otras profesiones, ya que éstos contribuirían a que los egresados fueran más empleables. Así, la formación humanística sería aquella que ayudaría a adquirir habilidades para trabajar “con gente”, sobre todo con la gente de diferente estatus en la organización.

Entremezcladas con estas visiones de gestión, aparecen visiones que entienden al ingeniero como profesional vinculado a problemas sociales y comienzan a preguntarse por la responsabilidad social de los profesionales vinculados a la creación y manipulación de tecnología, y desde qué lugar es posible el tratamiento profesional de problemáticas del mundo del trabajo y de la sociedad, como son la pobreza, las problemáticas ambientales, etc., aportando una visión de la actividad profesional más comprometida con los otros y con las problemáticas sociales. Estas otras visiones integran a la definición de contenidos “humanísticos” valores y posicionamientos, por ejemplo, respecto al valor estratégico de la Ingeniería en el desarrollo tecnológico soberano, acerca de la medida apropiada de la preocupación del ingeniero por la seguridad, el desarrollo sostenible y sustentable, y cuestiones ligadas a las relaciones entre éste y sus empleadores. La formación humanística estaría aquí vinculada al objetivo de que las responsabilidades sociales de los ingenieros no sean sólo enunciativas sino que sean consideradas como parte inescindible de la actividad profesional. De esta forma, los saberes sociales y humanísticos serían una dimensión más en la formación integral del ingeniero. Esta perspectiva habilita así escenarios complementarios y alternativos de inclusión de los SSH en relación al despliegue de prácticas de intervención y/o formación que implican un trabajo comprometido con los problemas de la sociedad.

En esta segunda etapa de la investigación (2015-2016) en la que hemos focalizado el relevamiento a las voces de jóvenes ingenieros e ingenieras que han realizado en la facultad actividades docentes, de tutorías y de gestión durante y/o luego de recibidos, encontramos que aunque difusos, siguen estando vigentes los saberes sociales y humanísticos y este mapa de visiones en sus expresiones, centrándose mayormente en las relaciones interpersonales propias de los ámbitos laborales, mencionando como “humanizante” el trato con “otros diferentes a uno mismo” (niños, estudiantes con dificultades, personas con discapacidad), y continúan apareciendo aunque con menor frecuencia dilemas en relación a la responsabilidad social y el compromiso de la práctica profesional ingenieril. Por otra parte, va tomando fuerza la presencia de las cuestiones ambientales y (en menor medida) el aporte de la ingeniería al desarrollo sostenible y justo como preocupaciones de las prácticas profesionales de los y las ingenieros jóvenes.

Aparece como escenario de inclusión de estos saberes la realización de actividades que impliquen “ayudar a otros”, con presencia en los relatos de actividades de extensión y de ayudas a compañeros estudiantes en formatos tales como tutorías, apoyos o ayudantías de cátedra, propuestos como similares a experiencias de participación en actividades comunitarias organizadas fuera de la Facultad (escuela, iglesia, organización barrial o política). Respecto a lo humano o lo social vinculado al saber profesional y los proyectos técnicos, los y las jóvenes estudiantes y profesionales consultados sostienen la discusión respecto a si la participación o compromiso en estas actividades se pueden o deben formar en la universidad (a través de vivenciar proyectos sociales, de acercamiento a la realidad concreta) o debe recostarse en las experiencias previas e iniciativas individuales de cada estudiante o profesional (en la familia, la escuela, la comunidad, previo a la universidad o a lo largo de la vida), y si es correcto vincular la actividad profesional sólo con ganancias

económicas o también con el desarrollo de acciones comprometidas socialmente. Continúa apareciendo la construcción de habilidades de liderazgo como centrales para impulsar el desarrollo de proyectos con compromiso social.

En relación a las expresiones de una referente de las humanidades que es a su vez una autoridad de la gestión de la UNLP, aún cuando por el momento parece no ser un tema de agenda la cuestión social en la formación de profesionales en ciencia y tecnología, se visualiza a las disciplinas que se dictan en la Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación (por ejemplo, la historia, la sociología o la filosofía) como las portadoras de este enfoque, vinculando la mirada social a las perspectivas críticas. Por otra parte, en intercambios públicos entre autoridades de las facultades de ciencias sociales de nuestra universidad, aparece como necesidad la idea de que las ciencias sociales encuentren un mínimo de acuerdo en los saberes y los enfoques que deberían constituir este campo.

En síntesis, este segundo relevamiento ha permitido construir dos preguntas respecto a las posibilidades de materialización curricular de estos saberes: cuál podría ser ese mínimo de saberes sociales y humanísticos en los que deberían formarse los y las ingenieros/as y si la manera de formarlos es garantizar que todos los estudiantes participen de un proyecto con compromiso social.

Hasta aquí, y entre las dos hipótesis, se ha intentado esbozar un escenario en el cual los saberes sociales y humanísticos se muestran difusos no sólo en lo nominal sino en sus posibilidades de materialización. En este sentido se afirma que se trataría de saberes “difíciles de asir”, en los términos en los que se ha planteado en otras instancias para el caso de los saberes de las prácticas profesionales: “Tanto la necesidad de traducción de estos saberes para disponerlos curricularmente como la noción de práctica y saberes asociados a la misma -apenas esbozadas aquí- dan cuenta que se trata de saberes más difíciles de asir. Se trata de saberes cuya complejidad hace que se resistan a ser “capturados” para su tratamiento curricular y didáctico, por lo tanto requieren una reflexión prudente por parte de quienes estamos involucrados en la formación para el ejercicio profesional. En este sentido la necesaria selección y su traducción al intentar hacer enseñables estos saberes debe ser una invitación a la deliberación entre los diferentes actores partícipes de las situaciones de intervención de los profesionales.” (Abate y Orellano, 2015:7)

### **Hacia una nueva etapa de indagación**

A partir de estas dos hipótesis que surgen en un territorio específico, y a pesar de esta complejidad curricular, se interpreta en algunos relatos y voces ingenieriles la potencia de estos saberes para pensar el rol estratégico de los profesionales en la sociedad. En este sentido, aún en este escenario difuso e incierto respecto a la continuidad de su presencia en el curriculum escrito, se sigue sosteniendo que vale la pena detenerse en los saberes sociales y humanísticos ya que pueden ser movilizantes para imaginar una variedad de formas de visibilizar temas, perspectivas, preocupaciones propias de esta época y en este sentido ser un aporte las discusiones respecto a la función social de la Universidad. Como se ha sostenido al inicio de este trabajo, la incorporación de enfoques humanísticos sería una oportunidad para poner en el centro la preocupación por la formación de futuras y futuros ingenieros/as que realicen una lectura de la realidad que los y las interpele para constituirse en sujetos que opten por actuar por el bien común.

No obstante, el actual contexto de crisis estructural regional y mundial se presenta difícil para pensar la estructuración de un curriculum alrededor de un proyecto formativo orientado a los compromisos sociales, políticos y éticos que debería asumir el ingeniero: ¿es posible definir/acordar un piso común no discutible respecto a los contenidos deseables de SSH en la formación profesional y ciudadana? ¿qué voces autorizadas orientan lo que significa el bien común? ¿los dirigentes? ¿la academia? ¿el sector tecnológico? ¿los sujetos sociales

involucrados/impactados por la actividad profesional? ¿en qué ámbitos se pueden dar estas discusiones?

Es por ello que se ha propuesto transitar una nueva etapa de esta investigación en la que se incluyan otros territorios (instituciones educativas) y otras voces, con la intención de configurar un espacio meta curricular que permita articular y condensar el estudio de problemáticas sociales y humanas vinculadas a la formación de ingenieros. La intención será caracterizar una agenda propia de temas transversales y controversiales -propia en relación a los saberes ingenieriles y en relación al contexto de incidencia de los ingenieros-, a partir de relevar la opinión sobre los temas sociales de preocupación en los distintos contextos bajo análisis de referentes curriculares representativos de las diferentes perspectivas y conversar con “otros” una lista de temas en función de lecturas de nuestra realidad social y el lugar de la ingeniería en la misma.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**Abate, S. M., Lucino, C., Lyons, S.** (2014) Visiones sobre saberes socio-humanísticos en la formación de ingenieros: algunas conjeturas. I Encuentro Internacional de Educación. Espacios de Investigación y Divulgación. 1a ed. - Tandil - Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.

**Abate, S. M., Lyons, S., Lucino, C.** (2013) “Construyendo un objeto de enseñanza e investigación. Los saberes socio - humanísticos en la formación de ingenieros.” Universidad nacional de San Luis.

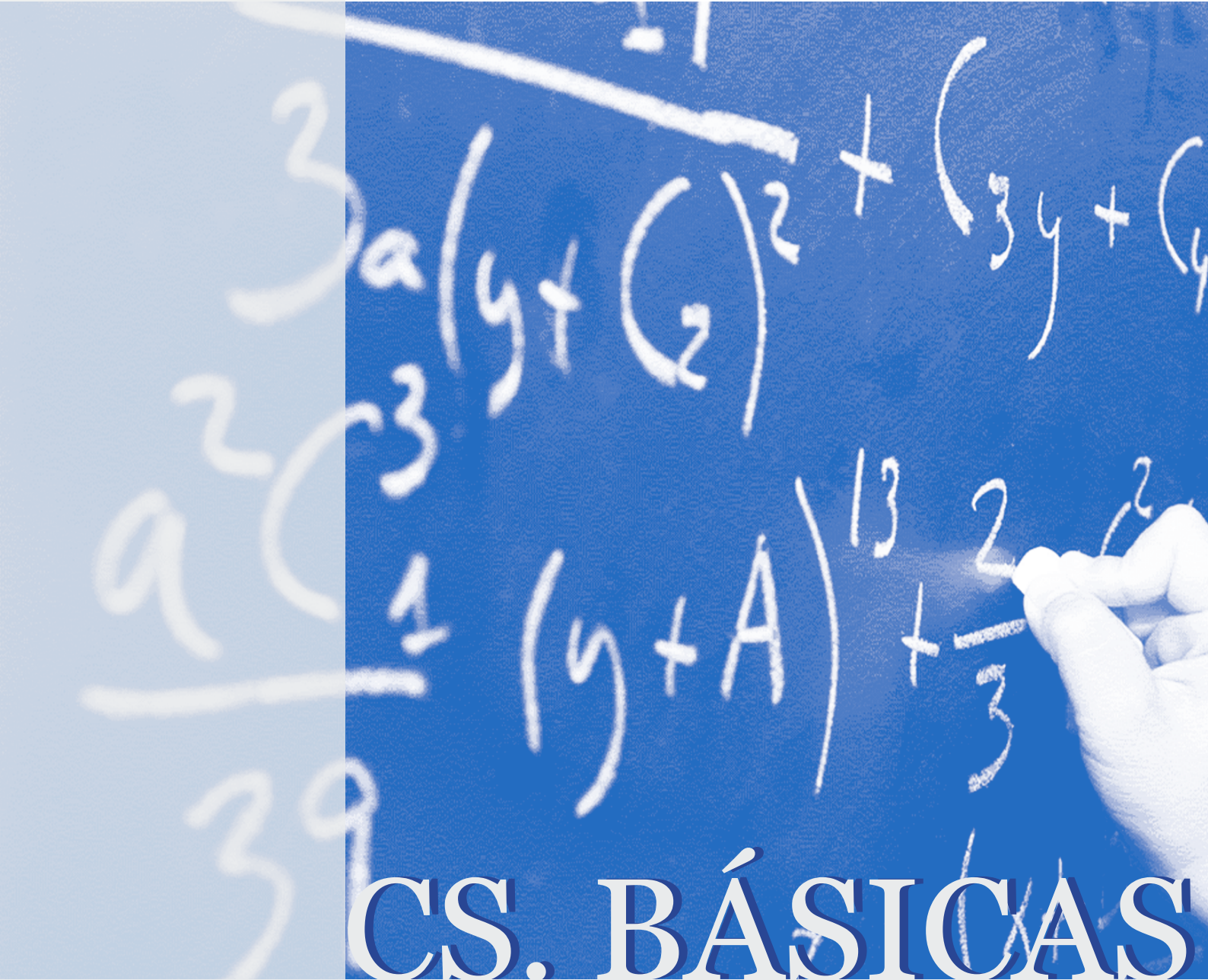
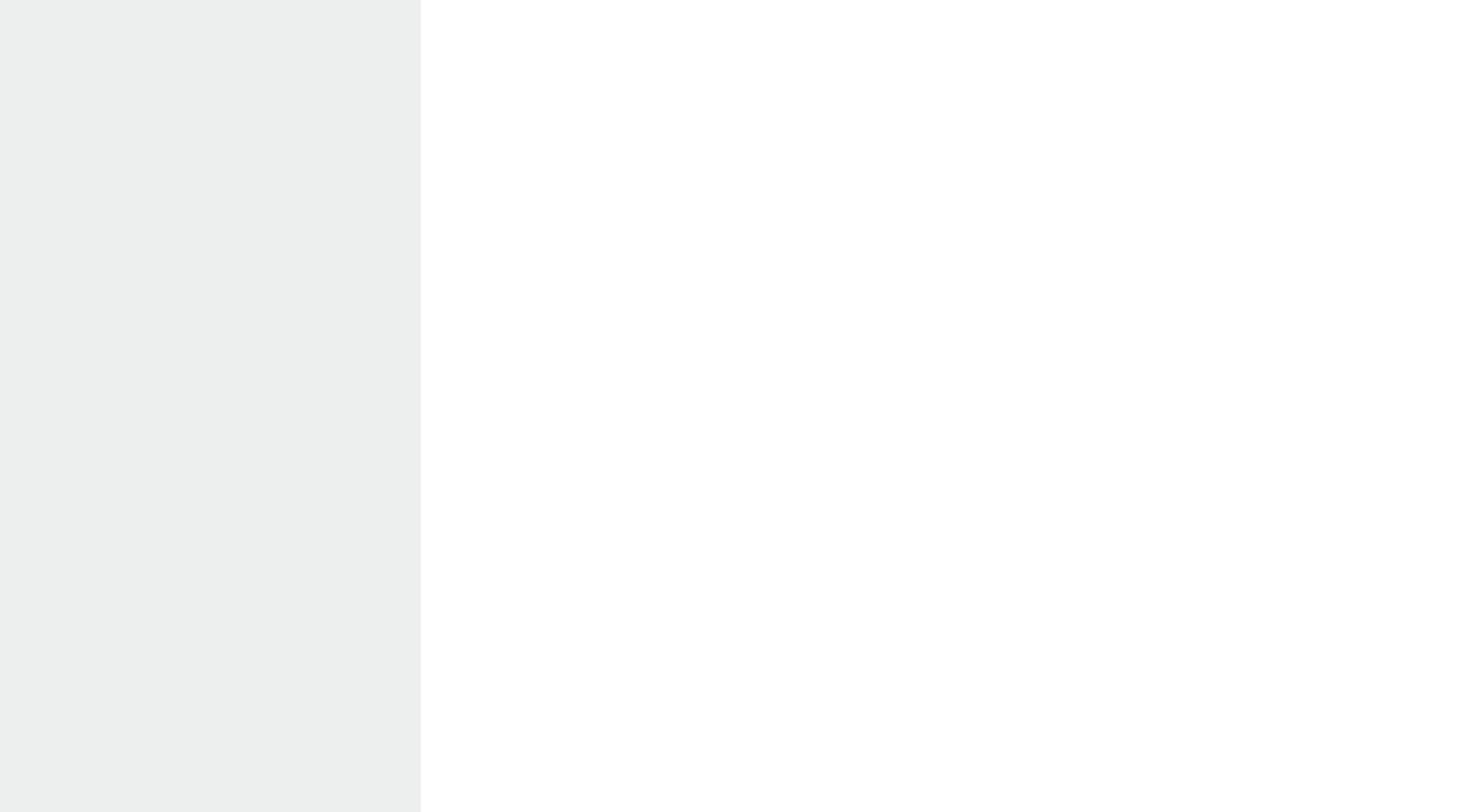
**Abate, S. M. y Orellano, V.** (2015): Notas sobre el curriculum universitario, prácticas profesionales y saberes en uso. Revista Trayectorias Universitarias. Volumen 1. Nº1.

**Cullen, C. A.** (2001): Aportes para el debate curricular. Trayecto de Formación Centrado en la Enseñanza en el Nivel Primario. Materia: Formación Ética y Ciudadana. Documento de la Secretaría de Educación del Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

**de Alba, A.** (1995). Currículum: crisis, mito y perspectivas. Buenos Aires: Miño y Dávila.

**Tello, C. y Gorostiaga, J.** (2009). El enfoque de la cartografía social para el análisis de debates sobre políticas educativas. Praxis Educativa, Ponta Grossa, v.4, n.2, p.159-168, jul.-dez. 2009.





CS. BÁSICAS



## RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS ALTIMÉTRICOS MEDIANTE LA ARTICULACIÓN ENTRE CÁTEDRAS DE DISTINTAS ÁREAS

Justo Claudio Eduardo, Costa Viviana Angélica.

UIDET: IMApEC, Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 49 y 115, La Plata, 1900, [cejusto@yahoo.com.ar](mailto:cejusto@yahoo.com.ar)

### Introducción

En este artículo se presentan los resultados de una actividad de articulación entre dos Áreas de la Facultad de Ingeniería de la UNLP (FI) que combina tanto la docencia, la investigación, como la extensión, y que se viene desarrollando desde hace dos años (segundo semestre de 2014) en forma continua. La misma consiste en la resolución de una tarea profesional que es de incumbencia del Ingeniero Agrimensor mediante herramientas matemáticas que se enseñan en la asignatura Matemática C del Ciclo Básico (tercer semestre) de esta Facultad, cuyos contenidos corresponden a los de Álgebra Lineal.

La tarea profesional es ofrecida por la cátedra de Cálculo de Compensación (quinto semestre) de la carrera Ingeniero Agrimensor y tiene por objetivo dotar de cotas y sus respectivas incertidumbres a las ménsulas altimétricas (marcas físicas) que existen en muchos de los edificios de la Facultad. Se denominan cotas a las alturas respecto de un nivel tomado como referencia, en este caso, el nivel medio del mar de Mar del Plata (nivel de referencia para la red del Instituto Geográfico Nacional) de las ménsulas empotradas. Para este trabajo se adopta un sistema de alturas topográfico para el cual existe una relación constante entre la variación de alturas geométricas y la variación del potencial gravimétrico. Entonces se modelan las superficies equipotenciales con esferas concéntricas. Esto no es cierto para puntos lo suficientemente lejanos (Wolf y Brinker, 1998).

La resolución del problema requiere modelar matemáticamente una situación real, utilizando herramientas del Álgebra Lineal, en especial, la construcción de matrices, sus operaciones, resolución de sistemas de ecuaciones lineales y el empleo del Método de Mínimos Cuadrados para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales inconsistentes. Esta área de la matemática es conocida como de difícil comprensión, por esto, varios investigadores recomiendan, para un mejor aprendizaje, motivar los contenidos desde la geometría y desde la ingeniería aplicada (Carlson, Johnson, Lay & Porter, 1993; Dorier, 2003; Hillel, 2000; Hillel, Sierpinska, & Trgalova, 1999).

El trabajo es realizado por alumnos de Matemática C (tercer semestre), y de Cálculo de Compensación (quinto semestre) de la carrera Ingeniero Agrimensor. También se inscribieron para la actividad algunos estudiantes de las carreras de Ingeniería Civil e Ingeniería Hidráulica así como un egresado de la carrera de Ing. Agrimensor.

Esta actividad, poco frecuente, permite el trabajo entre pares de distintos años, enfocados en resolver conjuntamente un trabajo profesional real con las herramientas matemáticas provistas por las cátedras convocantes.

Se persiguen con la actividad varios objetivos. Entre ellos, acercar al alumno menos avanzado en la carrera, al modelado de situaciones topográficas relativamente simples y que lo prepararán para encarar situaciones más complejas. Entendemos el modelado matemático de un problema como un proceso intelectual que incluye las capacidades de estructurar la situación que se va a modelar, traducir la realidad a una estructura matemática, interpretar los modelos matemáticos en términos reales, trabajar con un modelo matemático, reflexionar, analizar y ofrecer la crítica de un modelo y sus resultados, así de este modo lo definen Blomhøj (2008) y de la Fuente Martínez (2009).

Otro de los objetivos, es el de motivar al alumno del Área de Ciencias Básicas, en el aprendizaje de la matemática de una forma diferente a la habitual en esta Área, donde en general los conocimientos se estudian aislados de las demás disciplinas (física y química) y descontextualizados de las distintas especialidades de la ingeniería y del ejercicio profesional. De este modo, el aprendiz, estudia la matemática otorgándole a la misma una

utilidad y significado en la resolución de problemas de su carrera arribando naturalmente a una situación de aprendizaje significativo donde se ve enfrentado a problemas reales que debe resolver reemplazando al ejercicio creado con fines didácticos. Las metas constituyen la principal variable que influye en la motivación. En nuestro caso, se encuentra centrada en la realización de una tarea, que puede dar origen a algunos tipos de motivación, las denominadas de competencia e intrínseca. Según Farías y Pérez (2010), estos tipos de motivación son aquellas por las cuales el estudiante es atrapado por el tema de estudio, o bien por ser de su interés, a veces no tanto por los contenidos sino por los procedimientos que se utilizan para ello, provocando que el aprendiz se sienta a gusto o cómodo con aquello que realiza.

Para los alumnos avanzados, el desarrollo de la actividad propuesta, tiene por objetivo el de transmitir conocimiento a sus pares menos avanzados. Algunos investigadores afirman que es clave en el proceso educativo generar espacios de este estilo. Se aprende solo, pero también, y sobre todo, con otros, en el diálogo con otros y con el entorno social. De esta forma, trabajar en conjunto entre pares, se convierte en una cuestión de optimización del tiempo de aula. También, los alumnos avanzados se relacionan con sus conocimientos anteriores (en este caso, conocimientos matemáticos) permitiéndoles reafirmarlos, ampliarlos, cuestionarlos y hasta ponerlos en duda para proponer nuevas miradas y abordajes.

Finalmente esta actividad contribuye a integrar y dar continuidad a los contenidos de estudio en las distintas áreas de las carreras, y dar respuesta a los estudiantes a la pregunta ¿Qué puedo hacer con lo que estoy estudiando en mi ejercicio profesional?

### **Parte experimental**

Los participantes de la actividad realizaron el trabajo de campo en el predio de la Facultad de Ingeniería. El problema consistió en determinar las cotas y su incertidumbre estándar para el conjunto de ménsulas de esta Facultad. Se seleccionaron los siguientes puntos del predio: Agrimensura Viejo (Av), Partenón (P), Hidráulica (H), Construcciones (C), Química 1 (Q1), Química 2 (Q2), Decanato (D), Agrimensura Nuevo (An), como se observa en la imagen satelital de la Figura 1.

El Área Departamental Agrimensura proveyó el instrumental utilizado: varios equipos de nivelación automáticos de marca Sokkia, con sus respectivos trípodes y miras. A pedido de los alumnos se utilizó también un equipo digital, de última generación, con miras con código de barras.

Antes de iniciar la medición, se determina la influencia del error instrumental en las observaciones, dado que el modelo matemático de las mismas no incluye la existencia del error instrumental. Luego para atenuar cualquier efecto residual se buscará respetar la equidistancia entre la mira y el equipo de nivelación durante todo el trabajo, según las Figuras 2.

Se busca en esta etapa hacer énfasis en la importancia del correcto entendimiento del problema para posteriormente modelar las observaciones apropiadamente.

Con el instrumental utilizado y las consideraciones mencionadas, los participantes midieron las diferencias de alturas desde Av a P, de P a H, de H a C, de C a Q2, de Q2 a D, de D a Q1, de Q1 a An y de An a Av (Cuadro 1). Este procedimiento se realiza también en sentido inverso para mejorar la redundancia de los datos obtenidos.

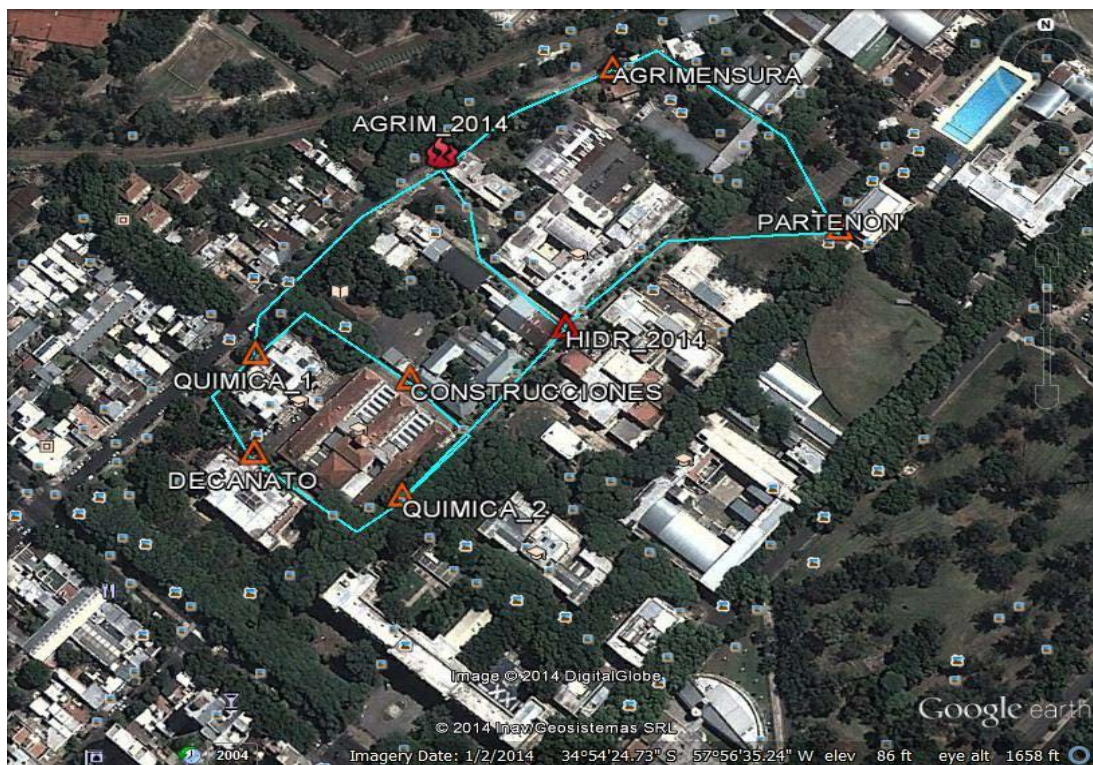


Figura 1: Puntos seleccionados en el campus de la Facultad de Ingeniería.

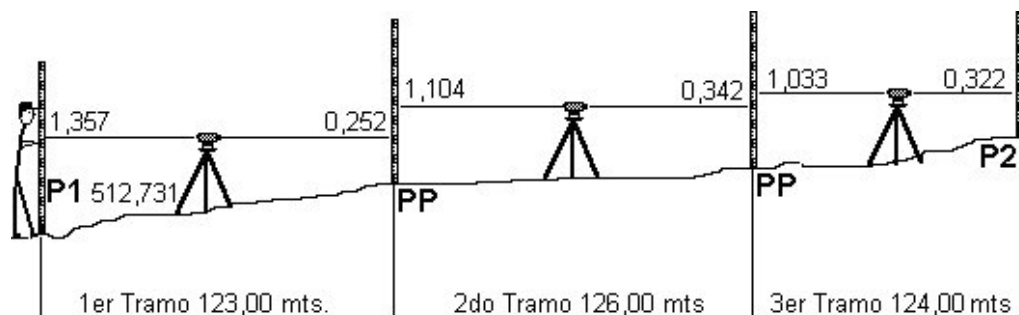


Figura 2. Esquema de trabajo.

### Resultados y discusión

Luego de realizar la experimentación y obtenidas las mediciones del Cuadro 1, los participantes proceden a resolver el problema. Para ello cada tramo medido lo modelan matemáticamente mediante una ecuación lineal.

Edificio	Nomenclatura	Tramo	$\Delta h$
Agrimensura Viejo	Av	Av a P	0.273m
Partenón	P	P a H	1.606m
Hidráulica	H	H a C	0.832m
Construcciones	C	C a Q2	0.920m
Química 2	Q2	Q2 a D	-0.378m
Decanato	D	D a Q1	-0.108m
Química 1	Q1	Q1 a An	-0.858m
Agrimensura Nuevo	An	An a Av	-2.296m

Cuadro 1. Diferencias de alturas observadas.

Por ejemplo, para el primer tramo, entre el viejo edificio del Área Departamental Agrimensura y el Partenón proponen la ecuación

$$P - Av = 0.273$$

De esta forma logran un sistema de ecuaciones lineales del que se querrá obtener su solución, que en notación matricial tiene la siguiente forma:

$$\begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Av \\ P \\ H \\ C \\ Q2 \\ D \\ Q1 \\ An \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.273 \\ 1.606 \\ 0.832 \\ 0.920 \\ -0.378 \\ -0.108 \\ -0.858 \\ -2.296 \end{pmatrix}$$

La matriz del sistema y el término independiente son cargados en el software GeoGebra, que es libre, de fácil uso y acepta realizar cálculos matriciales dispuestos como en una planilla de cálculo. Denotan A, a la matriz del sistema, X el vector de las incógnitas y b al vector del término independiente, para luego proceder con la búsqueda de su resolución. Para ello, analizan el sistema de ecuaciones, encontrando que la matriz A es singular (no invertible) con lo cual el sistema es compatible indeterminado o no tiene solución. Es decir que no existe ningún vector X tal que A.X sea igual a b. En este caso, el sistema no admite solución, porque el término independiente no es combinación lineal de las columnas de la matriz, o lo que es equivalente a decir que el vector b no pertenece al espacio columna de la matriz A. Esto es debido a que la suma de los desniveles, que debería ser cero, no lo es, por deberse la toma de observaciones a un proceso aleatorio. Entonces, en estos casos de incompatibilidad, se busca una alternativa que dé respuesta al problema.

El método de Mínimos Cuadrados es una de ellas. Consiste en hallar la “mejor solución X” al sistema de ecuaciones lineales incompatible A.X=b, A de orden mxn y b de orden mx1. Con “mejor solución” se refiere a que se busca  $X_0$  en  $R^n$  tal que verifique lo siguiente en norma 2:

$$\min_{X_0} \|A.X_0 - b\|$$

denominando en este caso residuo al vector:

$$r = A.X_0 - b.$$

De esta manera el modelo lineal expresa la relación entre las observaciones y parámetros (cotas), incluyendo un residuo  $r$  de modo que por ejemplo la primera ecuación sería de la forma:

$$P - Av = 0.273 + r_{P-Av}$$

Para cualquier  $X \in R^n$ , A.X es combinación lineal de las columnas de A, por lo que entonces el método busca el vector  $X_0$  que es combinación de las columnas de A que sea más “cercano” a b. Esto ocurre cuando A.X<sub>0</sub> es la proyección ortogonal de b sobre el espacio columna de A, es decir que el vector (b - A.X<sub>0</sub>) es ortogonal al vector A.Y,  $\forall Y \in R^n$ . Entonces el producto escalar entre A.Y por (b - A.X<sub>0</sub>) debe ser cero,  $\forall Y \in R^n$ : Se obtiene entonces:

$$Y^t A^t (b - A.X_0) = 0 \quad \forall Y \in R^n$$



$$Y^t A^t v = 0 \quad \forall Y \in R^n$$

Entonces:

$$Y^t (A^t \cdot b - A^t \cdot A \cdot X_0) = 0 \quad \forall Y \in R^n$$

Se deduce que:

$$A^t A \cdot X_0 = A^t b$$

Al sistema de ecuaciones anterior se lo denomina sistema de ecuaciones normales (Lay, & Murrieta, 2007; Strang, 2007). Tal sistema es compatible determinado si la matriz  $A^t \cdot A$  es no singular y entonces en este caso la solución del sistema sería única e igual a:

$$X_0 = (A^t A)^{-1} A^t \cdot b$$

Pero en este problema la matriz  $A$  de coeficientes del sistema es singular. Entonces utilizando el dato conocido de la cota de  $Av=15,914m$  la reemplazan en el sistema y se obtiene uno nuevo cuya matriz de coeficientes tiene sus columnas linealmente independientes, lo que asegurará que la matriz  $A^t \cdot A$  sea no singular.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} P \\ H \\ C \\ Q2 \\ D \\ Q1 \\ An \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 16.187 \\ 1.606 \\ 0.832 \\ 0.920 \\ -0.378 \\ -0.108 \\ -0.858 \\ -18.296 \end{pmatrix}$$

Proceden entonces a hallar la solución del sistema de ecuaciones normales con este último sistema (incompatible), pero con columnas linealmente independientes, que denominaremos  $A^* \cdot X^* = b^*$ , obteniendo los valores para las cotas (Cuadro 2).

Edificio	Cotas (m)
Agrimensura Viejo	15.914
Partenón	16.188
Hidráulica	17.795
Construcciones	18.628
Química 2	19.549
Decanato	19.172
Química 1	19.065
Agrimensura Nuevo	18.208

Cuadro 2. Cotas encontradas.

Encontrado el vector solución, calculan el vector de residuos  $r=A \cdot X - b$ , que es constante e igual a  $r= (0.0011, 0.0011, 0.0011, 0.0011, 0.0011, 0.0011, 0.0011, 0.0011)^t$  y su norma 2 es  $\|A \cdot X - b\| = 0.0031$ .

Con estos resultados es posible comenzar un análisis estadístico de los mismos y que aportarán un conocimiento acerca de la variabilidad esperada de un trabajo realizado en similares condiciones.

## Conclusiones

Los resultados observados en esta actividad son de diverso índole académico:

- Áulicos: se dotó a los alumnos de un espacio donde desarrollar un trabajo continuo y progresivo durante dos años consecutivos en el estudio de contenidos que permiten

- la resolución de un trabajo profesional. Para los docentes implicó un acercamiento de los saberes que imparten y la posibilidad de desarrollar mejores estrategias de enseñanza.
- Curriculares: esta actividad permitió ver la necesidad de abordar en el grado, el estudio de sistemas de ecuaciones lineales sobre-determinados y del método de Mínimos Cuadrados.
  - Monitoreo/seguimiento de los estudiantes: se logró observar la poca continuidad de los estudiantes de Ingeniero Agrimensor en la carrera durante el período trabajado: primer semestre 2015 al primer semestre 2016.
  - Presentación a congresos: los primeros resultados fueron presentados en el XIX EMCI Nacional, XI Internacional, San Nicolás de los Arroyos en el año 2015.
  - Difusión y extensión: se ofreció este espacio a la matrícula profesional por medio del Colegio de Distrito V del Consejo Profesional de Agrimensura. Se contó con la participación de un matriculado. Esta actividad profesional no se realizaba anteriormente como trabajo curricular en la carrera de Ingeniero Agrimensor.
  - Otros: los resultados obtenidos de las ménsulas sirven de referencia para las diferentes tareas docentes de las asignaturas vinculadas a la Topografía y como material didáctico para quienes deseen trabajar con datos reales.
  - La Facultad contará con una actualización permanente de su red altimétrica.

### **Bibliografía**

Blomhøj, M. (2008). Modelización matemática-una teoría para la práctica. *Revista de Educación Matemática*, 23(2).

Carlson, D., Johnson, C. R., Lay, D. C., & Porter, A. D. (1993). The Linear Algebra Curriculum Study Group recommendations for the first course in linear algebra. *The College Mathematics Journal*, 24(1), 41-46.

de la Fuente Martínez, C. (2009). Modelos matemáticos, resolución de problemas y proceso de creación y descubrimiento en matemáticas. *Conexiones y aprovechamiento didáctico en secundaria. Construcción de modelos matemáticos y resolución de problemas*, 123-154.

Dorier, J. L. (2003). Teaching linear algebra at university. arXiv preprint math/0305018.

Farías, D., & Pérez, J. (2010). Motivación en la Enseñanza de las Matemáticas y la Administración. *Formación universitaria*, 3(6), 33-40.

Hillel, J. (2000). Modes of description and the problem of representation in linear algebra. In *On the teaching of linear algebra* (pp. 191-207). Springer Netherlands.

Hillel, J., Sierpinska, A., & Trgalova, J. (1999). Teaching and Learning Linear Algebra with Cabri. *PME 23 Proceedings*.

Lay, D. C., & Murrieta, J. M. (2007). Algebra lineal y sus aplicaciones. J. E. M. Murrieta (Ed.). Pearson educación.

Strang, G. S. (2007). Algebra lineal y sus aplicaciones. Thomson.

Wolf P., Brinker R. (1998). Topografía. Alfaomega.



## UN ESTUDIO DE CASO SOBRE LA INTEGRACIÓN DE MATERIAL DIDÁCTICO HIPERMEDIAL PARA LA ENSEÑANZA DE LA MATEMÁTICA

Del Río, Laura<sup>1</sup>; Sanz, Cecilia<sup>2</sup>; Búcarí, Néstor<sup>3</sup>

<sup>1</sup> UIDET IMApEC – Departamento de Ciencias Básicas – Facultad de Ingeniería – UNLP

<sup>2</sup> III LIDI – Facultad de Informática – UNLP

<sup>3</sup> Departamento de Ciencias Básicas – Facultad de Ingeniería – UNLP

Calle 49 y 115, primer piso, [laura.delrio@ing.unlp.edu.ar](mailto:laura.delrio@ing.unlp.edu.ar)

### INTRODUCCIÓN

En los últimos 15 años, la enseñanza de la Matemática en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (FI UNLP) se ha transformado. Los roles del docente y del alumno han cambiado por completo. Ya no se tiene un docente que expone los contenidos de la materia frente a alumnos que los reciben y aplican, sino que el saber es producido por estos a partir de su trabajo en el aula, en conjunto con sus pares y con orientación de sus docentes.

Esta nueva metodología ha mostrado éxitos en relación al rendimiento académico de los estudiantes, a su capacidad para la retención del alumnado, a su forma de comprender la disciplina matemática [1, 2]. Sin embargo, se conocen algunas de las limitaciones que queda por enfrentar, lo cual conduce a continuar analizando diversas estrategias para superarlas.

Una de las preocupaciones a atender se relaciona con las dificultades que enfrentan los alumnos a la hora de iniciar el estudio de la geometría del espacio tridimensional. Desde los comienzos de la reforma curricular, estas dificultades intentaron abordarse mediante la utilización de *software* matemático (en particular *Maple*) a fin de habilitar a la visualización de los objetos matemáticos, considerando que la misma contribuiría a una mejor comprensión de los mismos [3]. Además, la adopción por parte de los alumnos de un programa informático para Matemática, constituyó un objetivo en sí mismo, debido a las características del quehacer matemático en el campo de la Ingeniería en la actualidad, ya que la gran mayoría de los cálculos se realizan utilizando herramientas informáticas.

Sin embargo, pese a los esfuerzos de los docentes y los resultados positivos observados en las ocasiones en las que se ha logrado integrar el *software* al proceso educativo, su adopción por parte de los estudiantes como herramienta de aprendizaje se ve dificultada por múltiples factores, como por ejemplo, las dificultades asociadas al uso técnico del *software* propuesto.

En vista de estas dificultades, se dio comienzo a un proceso de investigación en relación a una estrategia alternativa para lograr ambos objetivos: que los alumnos se familiaricen y adopten un *software* matemático y que logren comprender mejor los objetos matemáticos tridimensionales. Esta estrategia se basó en integrar a la planificación didáctica de la Cátedra un Material Didáctico Hipermedial (MDH) que incluye actividades a realizar en *GeoGebra*, un programa de uso libre más sencillo e intuitivo que *Maple*.

Un MDH es aquel que combina lenguajes propios del hipertexto y multimediales, es navegable y posibilita diferentes itinerarios. [4]. Tienen el potencial para facilitar representaciones gráficas del espacio tridimensional, para realizar actividades interactivas, e invitar a la exploración, la elaboración de conjeturas y la generalización. Estas cuestiones resultan relevantes para la enseñanza y el aprendizaje de la Matemática, sobre todo en relación a los temas que los alumnos de la FI UNLP deben abordar en su primer año al cursar la asignatura Matemática A.

Las preguntas orientadoras de la investigación a abordar en relación al uso del MDH son:

- La utilización del MDH ¿en qué aspectos facilita el proceso de aprendizaje de la Matemática? ¿En qué aspectos lo dificulta?;
- ¿Produce un cambio en la actitud de los estudiantes hacia la Matemática? ¿Y hacia la utilización de las TIC como instrumentos de aprendizaje?;
- Según varios autores [5, 6] los ambientes de geometría dinámica ofrecen representaciones manipulables de los objetos matemáticos, volviéndolos más accesibles. A partir de su utilización ¿qué tipo de aprendizajes adquieren los alumnos? ¿Potencian sus habilidades con el uso de la tecnología? ¿Pueden transferir los aprendizajes adquiridos a situaciones en las cuales no disponen de esa tecnología?

Si bien estas preguntas son muy amplias y difícilmente se logre obtener una respuesta definitiva a las mismas, se analiza en este trabajo un caso particular, con un material determinado, buscando aportar algunos indicios en relación a posibles respuestas.

## PARTE EXPERIMENTAL

Para el abordaje de la problemática de investigación descrita, se realizó un diseño cuanti-cualitativo de alcance descriptivo, aunque también se pudieron establecer algunas correlaciones entre variables, por ejemplo, entre ciertas características de los alumnos y la valoración final de la experiencia.

Previo al estudio de caso, se profundizó en la revisión de algunos marcos teóricos que permitieran abordar la problemática a investigar, en particular las teorías: de Situaciones Didácticas de Brousseau [7], de los Registros de Representación Semiótica de Duval [8], el Aprendizaje Multimedia de Mayer [9] y aportes del campo de la Tecnología Educativa. Asimismo se elaboró un estado del arte que permitió dar cuenta de las características de los usos actuales de los MDH para la enseñanza de la Matemática, y de la necesidad de una mejor articulación entre los aportes de la Didáctica Específica y la Tecnología Educativa [10].

El estudio de caso llevado a cabo posteriormente involucró:

- El desarrollo de un prototipo de MDH acorde con las consideraciones teóricas. El mismo se realizó utilizando los programas *eXeLearning* y *GeoGebra*.
- El diseño y la adaptación de instrumentos de recolección de datos apropiados para la evaluación de la implementación del MDH en la clase de Matemática A.
- La realización de una serie de experiencias áulicas en relación a las cuales se realizaron: a) encuestas a los estudiantes, b) entrevistas a los docentes involucrados, c) observación participante de las experiencias y d) análisis de producciones de los alumnos. Algunos de los aspectos fueron contrastados con grupos de control.

En la Figura 1 se muestra un esquema temporal que sintetiza los distintos momentos de aplicación de los diversos instrumentos de recolección de datos y que forman parte de la metodología desarrollada para esta investigación.

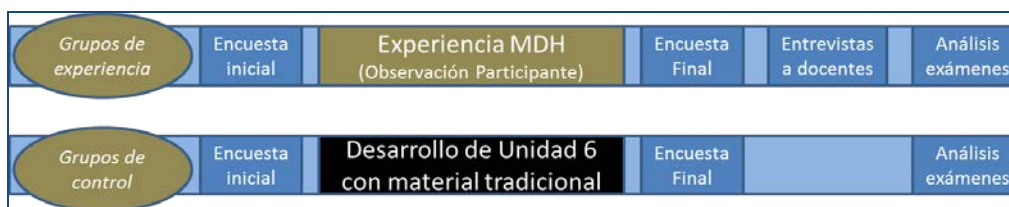


Figura 1. Esquema que sintetiza los distintos momentos de aplicación de los diversos instrumentos de recolección de datos.

Las encuestas incluyeron preguntas abiertas y cerradas. Una parte del cuestionario

permitió medir las actitudes de los estudiantes hacia las TIC y hacia la Matemática así como también los cambios de actitud al transitar la unidad 6 de la materia (en la cual se inicia el estudio del espacio tridimensional).

De las entrevistas a los docentes y la observación participante se realizó un análisis cualitativo buscando aportar a una comprensión más profunda complementando lo que fuera el punto de vista de los estudiantes manifestado en las encuestas. El análisis de las producciones escritas de los estudiantes en las evaluaciones parciales, buscó dar cuenta del impacto de la experiencia en los aprendizajes.

Del grupo de la experiencia participaron tres comisiones de Matemática A, con un total de 178 alumnos, y del grupo de control participaron otras tres comisiones, con un total de 188 alumnos.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### a. *De las encuestas a los alumnos*

Si bien la mayoría de los estudiantes valoraron la experiencia en forma positiva, no lo hicieron en la medida esperada (52% positivo, 6% negativo y 40% indistintos, un 2% no respondió la pregunta). Todos indicaron aspectos positivos y negativos del MDH. Entre los aspectos positivos, los más frecuentes fueron: a) que les permitió visualizar objetos del espacio tridimensional, b) la posibilidad de corroborar utilizando el *software GeoGebra* los ejercicios realizados a mano, y c) que les ayudó a comprender mejor los temas de la unidad abordada (este último grupo de alumnos no pudo dar cuenta de por qué o cómo el MDH les ayudó a comprender). Entre los aspectos negativos, los más frecuentes resultaron ser: a) el tiempo adicional que les demandó el uso del material en este nuevo formato, b) las dificultades que tuvieron para aprender a utilizar el programa *GeoGebra*, c) la escasez de computadoras disponibles (que los obligaba a adaptarse al ritmo de trabajo de los compañeros con los cuales compartían), y d) la incomodidad de tener que acarrear las computadoras (algunos traían sus *netbooks* de Conectar Igualdad desde sus domicilios y otros retiraban las *notebooks* del departamento de Ciencias Básicas a modo de préstamo para utilizar en el aula). Un grupo minoritario, pero que resulta interesante analizar, mencionó como aspecto negativo cuestiones relacionadas con el parcial. Por ejemplo, que al no poder disponer del programa *GeoGebra* en la evaluación, hacer actividades con esta herramienta les resta práctica en relación a la misma. Otro ejemplo es el de alumnos que indicaron que hacer tanto hincapié en la interpretación gráfica resta práctica en relación a la parte analítica “que es la que en realidad importa”.

El análisis que se realiza de estos aspectos indicados por los alumnos, es que aquellos que mencionaron como positivos, resultan más relevantes desde el punto de vista de la Didáctica que los negativos, ya que una ganancia en mejor comprensión y en autonomía a la hora de analizar si un problema matemático fue resuelto correctamente, resulta más relevante que haber tenido que dedicar tiempo, o haber tenido que compartir una computadora. Sin embargo, desde el punto de vista de los estudiantes, estas dificultades distinguidas tuvieron un impacto importante, que se manifiesta en la gran cantidad de alumnos que valoraron la experiencia en forma no positiva. También parece haber tenido un impacto negativo en relación a sus actitudes, ya que las actitudes hacia las TIC en general como hacia las TIC como herramientas para el aprendizaje de la Matemática registraron una disminución, que no se registró en los grupos de control (también disminuyó la actitud hacia las Matemáticas, pero esta disminución también fue registrada en los grupos de control). Para un mayor detalle sobre el análisis de actitudes se puede consultar [11].

Otros datos interesantes que se pueden adicionar a este análisis son los siguientes:

- Tanto a los alumnos del grupo de la experiencia como a los del grupo control se les pidió que indiquen si los contenidos de la unidad 6 les habían parecido: a) más fáciles, b) de igual

orden de dificultad, o c) más difíciles, que los de las unidades anteriores de la materia. Los resultados de esta pregunta se muestran en la Figura 2, y pueden interpretarse como que en cierta medida el pasaje del plano al espacio fue levemente menos abrupto para los alumnos que trabajaron con el MDH. Sin embargo, se considera que esto podría haber pasado inadvertido para los alumnos, que no han visto las dificultades de visualizar en el espacio 3D utilizando otros materiales y actividades educativas más tradicionales.

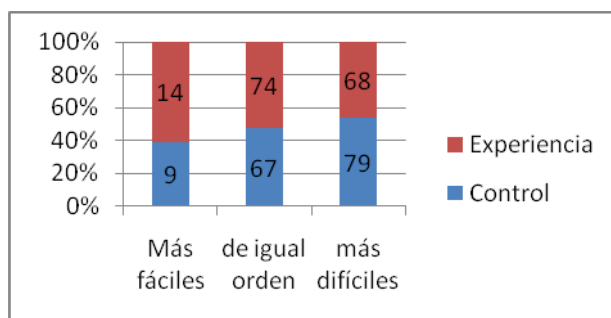


Figura 2. Respuesta de los alumnos a la pregunta realizada en relación a la dificultad relativa que perciben entre los temas de la unidad abordada en la experiencia y las anteriores de la materia.

- Otro indicador que se considera como positivo, más allá de los resultados obtenidos en relación a la valoración de la experiencia y el impacto en las actitudes es el siguiente: se incluyó en la encuesta una pregunta en relación a “si volverían a utilizar el *software GeoGebra* para trabajar en las siguientes unidades”. Las respuestas fueron: 89 sí, 9 no, y 3 no respondieron.

Por último, se intentó conocer qué variables de entrada correlacionan con la valoración final de la experiencia, a fin de saber si se pueden realizar acciones a futuro modificando dichas variables de manera tal que los estudiantes puedan sacar un mayor provecho del material proporcionado, o bien conocer para qué perfil de alumno este material podría resultar más adecuado. De los múltiples análisis de correlación que se llevaron a cabo, solamente dos resultaron estadísticamente significativos:

- Los alumnos que ya venían utilizando *GeoGebra* desde la escuela secundaria, valoraron mejor la experiencia que aquellos que no lo utilizaron nunca.
- Dado que la experiencia se realizó al trabajar la primera unidad que se estudia luego del primer parcial, se analizó si la nota obtenida en este influía en la valoración de la experiencia. Se encontró que tanto para los alumnos que habían desaprobado, como para aquellos que habían obtenido una muy buena nota, la valoración fue menor que para aquellos que aprobaron con nota menor o igual a 7. Esto podría deberse a que los alumnos que desaprobaron, tal vez por una cuestión de “desánimo” no se mostraron tan conformes con la experiencia, mientras que los que mejor salieron en el primer parcial, fueron los que menos valoración positiva dieron, tal vez porque ellos ya habían encontrado una estrategia que les resultó exitosa, y el cambio les resultó una complicación innecesaria.

#### **b. De las entrevistas con los docentes**

Finalizada la experiencia, se entrevistó a los docentes de los grupos que participaron de la experiencia, a fin de complementar el punto de vista de los alumnos y de la observación participante. Los principales resultados a destacar de estas entrevistas son los siguientes:

- En cuanto al MDH, los docentes a cargo de los grupos que realizaron la experiencia, lo valoraron positivamente. En primer lugar, porque facilita la visualización en  $\mathbb{R}^3$ . En segundo lugar, porque el uso del programa *Maple* revestía una dificultad de uso mucho mayor que el programa *GeoGebra*, por lo que no se lograba que los alumnos se apropien de él.
- Como dificultades mencionaron principalmente que no habían tenido suficiente tiempo para interactuar con el material previamente a la experiencia y familiarizarse con él.
- Comentaron que habían detectado que algunos alumnos utilizaban el *software*, pero en sus hogares y no en el aula, ya que al consultar indicaban que determinada cosa la habían visto con *GeoGebra* en sus casas y la consulta surgía a raíz de esa interacción con el programa.
- Al igual que los estudiantes, se mostraron preocupados por la cuestión del tiempo. La mayoría de ellos considera que los contenidos de la materia son muchos para que los alumnos puedan abordarlos con tranquilidad en el transcurso del curso, y que por eso cualquier modificación en la estrategia se vuelve complicada.

### **c. De la observación participante**

La primera observación a nivel general que se pudo hacer fue que durante la primera clase, todos los alumnos abordaron el MDH y trataron de realizar las actividades propuestas en él. Ya para la segunda clase, algunos alumnos continuaron de igual manera, mientras que otros comenzaron a utilizar en mayor medida el material impreso tradicional. Aquí se observan las dos posturas que se vieron luego reflejadas en las encuestas: los que se sintieron cómodos con el nuevo material y los que no.

A la hora de resolver los problemas, se observó en los alumnos que trabajaron con el MDH una actitud más exploratoria que la manifestada al trabajar con el material impreso, lápiz y papel. El trabajo con los *applets* de *GeoGebra* permitió esto al ofrecer un entorno en el que los alumnos pudieran aprender por ensayo y error. Las actividades propuestas se vieron enriquecidas, ya que dentro del entorno digital, los alumnos pudieron desplegar múltiples estrategias poniendo en juego distintos conocimientos previos, tal como lo demuestran los registros realizados de discusiones que se dieron en el aula. También es de notar cómo se relacionaron con el entorno de *GeoGebra*: en forma autónoma lograron recorrer la barra de herramientas, utilizar las ayudas proporcionadas al posicionar el cursor sobre el ícono de cada una de ellas, seleccionar aquellas que les parecieron adecuadas para resolver el problema. Se animaron a probar y a equivocarse, para luego corregir, tal como se observa en algunas de las construcciones entregadas, en las que se ve que utilizaron otros objetos que luego ocultaron porque decidieron que no les servían.

### **d. De las producciones de los alumnos en el parcial**

A fin de buscar evidencias de diferencias en relación a los aprendizajes adquiridos por los estudiantes, se analizaron las producciones escritas de los alumnos en el segundo examen parcial, comparando las resoluciones de los alumnos de las comisiones participantes de la experiencia con las de los grupos de control. Se analizaron los ejercicios relacionados con la unidad de la materia que fue objeto de la experiencia.

En este aspecto, no se hallaron diferencias significativas entre ambos grupos. Esto quiere decir que no puede afirmarse que el MDH haya tenido un impacto ni positivo ni negativo en los aprendizajes de los alumnos en relación a los contenidos de la materia, aunque sí en otros aspectos, como se mencionó en las secciones anteriores.

## **CONCLUSIONES**

Se puede concluir que el MDH implementado cumplió en buena medida con los objetivos didácticos que se habían propuesto: permitieron a los alumnos adoptar una herramienta



informática para el quehacer matemático que les aporta autonomía en la resolución y autocorrección de las actividades realizadas manualmente, y les facilitó la comprensión de los objetos matemáticos tridimensionales.

Sin embargo, existieron múltiples factores que afectaron la experiencia en forma negativa y esto redundó en que la misma no pueda ser aprovechada al máximo por los estudiantes implicados. Es por esto que se propone como trabajo de investigación a futuro indagar sobre la posibilidad de que el soporte de estos materiales sean dispositivos móviles, más portables, disponibles en las aulas en cantidades suficientes, dado que la gran mayoría de los estudiantes y docentes concurre a clase con *Smartphones*. Una posibilidad a explorar y evaluar, sería la de incluir en el material impreso de la cátedra códigos QR que conduzcan a la visualización de los recursos interactivos para que los alumnos puedan explorar con ellos desde el teléfono celular. Otra posibilidad, sería la de crear una aplicación para móviles que contenga accesos a estos recursos. Otra de las cuestiones que se pueden debatir y evaluar es en la posibilidad de incorporar estas herramientas en las evaluaciones.

### **Bibliografía**

- [1] Búcarí, N., S.M. Abate, A. Melgarejo. Un cambio en la enseñanza de las matemáticas en las carreras de ingeniería de UNLP: propuesta, criterios y alcance. IV CAEDI2004: Buenos Aires.
- [2] Búcarí, N., S.M. Abate, and A. Melgarejo. Estructura didáctica e innovación en educación matemática. Revista Argentina de Enseñanza de la Ingeniería, 2007. 8(14): p. 17-28.
- [3] Costa, V.A., R.M. Di Domenicantonio, M.C. Vacchino, Material educativo digital como recurso didáctico para el aprendizaje del Cálculo Integral y Vectorial. Unión, 2010. 21: p. 173-185.
- [4] Royo, J. Diseño digital. 2004: Paidós.
- [5] Carrillo, A. El dinamismo de GeoGebra. Unión, 2012. 29: p. 9-22.
- [6] Hohenwarter, M., Multiple representations and GeoGebra-based learning environments. Union, 2014. 39: p. 11-18.
- [7] Brousseau, G. Iniciación al estudio de la teoría de las situaciones didácticas. 2007: Del Zorzal.
- [8] Duval, R., Registros de representación semiótica y funcionamiento cognitivo del pensamiento, en Investigaciones en Matemática Educativa II, F. Hitt, Editor 1998, Grupo Editorial Iberoamérica: México. p. 173-201.
- [9] Mayer, R., The promise of multimedia learning: using the same instructional design methods across different media. Learning and instruction, 2003. 13: p. 125-139.
- [10] Del Río, L., N. Bucari, C.V. Sanz, Uso de recursos hipermediales para la enseñanza y el aprendizaje de la Matemática, en IICIECyM, III ENEM, 2016: Tandil. p. 153-158
- [11] Del Río, L., C.V. Sanz, N. Bucari, Actitudes de los estudiantes frente a un material hipermedial para el aprendizaje de la matemática: Un estudio de caso, en XI TE&ET 2016: Morón. p. 351-359.



## UNA PROPUESTA DIDÁCTICA QUE ARTICULA CONTENIDOS DE MATEMÁTICA Y FÍSICA

Torroba Patricia<sup>1</sup>, Devece Eugenio<sup>14</sup>, Trípoli María de las Mercedes<sup>2</sup>, Aquilano Luisina<sup>3</sup>

<sup>1</sup>UIDET IMApEC, Dpto. de Ciencias Básicas, FI, UNLP, 1 y 47, La Plata, Argentina.

<sup>2</sup>ETEMI, Dpto. de Ciencias Básicas, FI, UNLP, 1 y 47, La Plata, Argentina.

<sup>3</sup>Dpto. de Ciencias Básicas, FI, UNLP, 1 y 47, La Plata, Argentina.

<sup>4</sup>IEC EMEIPACIBA, FRLP. UTN Correo electrónico: [eugdvc@gmail.com](mailto:eugdvc@gmail.com)

### Resumen

En este trabajo se presenta una propuesta didáctica, para implementar en el aula, que permite articular temas abordados en Matemática A y en Física I, ambas asignaturas del Departamento de Ciencias Básicas. En esta instancia, una actividad experimental con uso de TIC aplica los contenidos estudiados en Matemática A a una situación real, promoviendo la necesidad de su estudio. Los temas que se vinculan son: el análisis de una función de una variable desde la matemática y conceptos de cinemática, desde la física. La actividad fue evaluada mediante encuestas anónimas. Los resultados indicaron que la propuesta resultó útil y motivadora. Además, los estudiantes mostraron que requieren de la presencia de los docentes para concretar la articulación entre ambos temas. Esta experiencia permitió valorizar la matemática como una herramienta que el futuro ingeniero deberá aplicar en su actividad como profesional.

Palabras clave: articulación; análisis de una función, cinemática, TIC

### INTRODUCCIÓN

A partir del año 2010 algunos docentes de asignaturas de Matemática y de Física del Dpto. de Ciencias Básicas de la Facultad de Ingeniería de la UNLP comenzaron a reunirse, con el interés de intercambiar las maneras en las cuales cada uno realiza la presentación a los alumnos, de conceptos que son comunes a ambas disciplinas. Se comenzó interactuando entre profesores de Física I (Mecánica Clásica) y Matemática C (Álgebra lineal), vinculando los conceptos de movimiento armónico simple (MAS) desde el punto de vista de la Física, y las ecuaciones diferenciales ordinarias de segundo orden lineal (EDO) desde la Matemática (Costa y otros, 2013).

Las actividades de articulación se extendieron a otras asignaturas, entre Física II y Matemática C (Torroba y otros, 2013); entre Matemática C, Física I y Mecánica Racional (Torroba y otros, 2014); entre Matemática A y Física I (Devece y otros, 2015).

La propuesta didáctica que se presenta en este trabajo intenta que el alumno articule notaciones, lenguaje y aplique herramientas y conocimientos previos en nuevos contextos que le permitan una mejor articulación entre las disciplinas mencionadas.

La gran mayoría de los alumnos que cursan Matemática A estudiaron en la escuela media las expresiones del movimiento con aceleración constante. La actividad experimental propuesta se implementa, en una clase de dicha asignatura con la presencia de sus docentes junto con los de Física I. En la instancia en que se realiza la práctica, los estudiantes ya abordaron el concepto de derivada en una variable y realizaron el análisis completo de una función. El uso de TIC permite tomar datos a tiempo real, representar gráficamente los resultados y analizarlos desde el punto de vista matemático así como asignar significado físico a las magnitudes cinemáticas involucradas.

La labor se evalúa mediante encuestas anónimas hechas a alumnos que participaron de la actividad que se compararon con otras obtenidas con estudiantes de otras comisiones que no la realizaron.

### **Marco teórico**

A pesar de saber que la herramienta–matemática juega un papel importante en el desarrollo de las ciencias, en la tecnología y para interpretar situaciones de la vida cotidiana, el proceso de enseñanza y aprendizaje se realiza, en muchas ocasiones, con cierta abstracción que aleja esta ciencia de la realidad de los estudiantes y de sus intereses (Alfaro y Fonseca, 2016). Es necesario, por ello, que los docentes propicien situaciones didácticas en las cuales los estudiantes realicen actividades que fomenten la capacidad de integración de conceptos matemáticos en distintas áreas. En este caso la física se emplea para apreciar el valor y utilidad de esta herramienta.

“Es un desafío para los docentes de los primeros años de las carreras de ingeniería tratar que el alumno considere que está aprendiendo algo útil, que no está perdiendo el tiempo y que está estudiando algo que va a poder aplicar a lo largo de la carrera.” (Devece y otros, 2015)

Como los estudiantes son de primer año, aun no cuentan con la competencia necesaria para articular por si solos los conocimientos previos y los nuevos que van incorporando, por lo que es necesaria la colaboración del docente para que el alumno pueda llevar a cabo este proceso. En este sentido, se consideró la teoría del aprendizaje significativo, (Ausubel y otros, 1976), en la que se plantea que el aprendizaje del alumno depende de la estructura cognitiva previa que se relaciona con la nueva información entendiendo estructura cognitiva al conjunto de conceptos, ideas que un individuo posee en un determinado campo del conocimiento, así como su organización. En esta teoría se considera que el aprendizaje significativo sucede cuando una nueva información se conecta con un concepto relevante preexistente en la estructura cognitiva, así los nuevos conceptos pueden ser aprendidos en forma significativa en la medida en que otros conceptos relevantes estén adecuadamente claros y disponibles en la estructura cognitiva del individuo y que funcione como un punto de anclaje de la primera. Por lo tanto, el docente debe considerar lo que el alumno ya sabe, de tal manera que establezca una relación con aquello que debe aprender. Además, Ausubel destaca que para que se produzca aprendizaje significativo, el aprendiz debe querer aprender.

Es nuestro propósito, con estas actividades de articulación, favorecer la integración y construcción de los conocimientos, siendo ésta una manera de motivar el aprendizaje de modo significativo. Además, se considera necesario interceder ante las dificultades académicas detectadas en los alumnos tratando de evitar las confusiones a las que da lugar el uso de terminología, nomenclatura, simbología y definiciones (Alfaro y Fonseca 2016), En este contexto se propone realizar una actividad experimental con el empleo de TIC que genere una situación problemática que permita al alumnado vincularla con la realidad.

### **Actividad de articulación**

Se realizó una actividad de articulación vertical entre dos materias del Área Básica de Ingeniería, Matemática A y Física I. Como se menciona en Devece y otros (2015), el objetivo del trabajo que venimos desarrollando es que los alumnos, mediante actividades complementarias, analicen situaciones problemáticas que serán recuperadas en otras asignaturas y valoricen la utilidad de la matemática.

El objetivo específico de la actividad que se relata, fue utilizar el análisis de una función en una situación física experimental y contrastar los resultados del modelo teórico con los resultados experimentales. Los temas que se vincularon fueron el análisis de una función de

una variable desde la matemática y conceptos de cinemática, desde la física. Al analizar una función, aparece el concepto de derivada; éstas pueden usarse para calcular, en el lenguaje matemático, las razones de cambio instantáneo. La razón de cambio de la posición respecto al tiempo es la velocidad y la razón de cambio de la velocidad respecto al tiempo es la aceleración. Desde el punto de vista del lenguaje físico, la velocidad es la derivada de la posición respecto al tiempo, y la aceleración es la derivada de la velocidad respecto al tiempo. Usando estas ideas, podremos analizar el movimiento unidimensional de una partícula dada su posición en función del tiempo.

Los estudiantes que realizaron la actividad fueron treinta y dos, inscriptos en una comisión de las dieciséis que tiene Matemática A en los primeros semestres y que están cursando por primera vez la asignatura. La actividad se llevó a cabo en una hora reloj. El momento curricular elegido fue al terminar la unidad en la que se realiza el análisis completo de una función de una variable.

La actividad consistió en la presentación, por parte de docentes de Física I, de conceptos físicos referidos al movimiento rectilíneo uniforme (MRU) y uniformemente variado (MRVU). Se tuvo en cuenta, al momento de pensar la experiencia, que los alumnos deberían haber vistos dichos conceptos en la escuela media, es por ello, que al momento de la presentación en el aula se propició la participación del alumno intentando recuperar los mismos y, además, vincularlos con las herramientas matemáticas estudiadas en la asignatura de matemática que estaban cursando en ese momento (la relación entre una función y su derivada).

Otro de los aspectos que se enfatizó fue las distintas notaciones y lenguajes que se utilizan en ambas asignaturas, pues ya se había observado en las clases de física la dificultad que presentan los estudiantes cuando, a pesar de haber vistos los conceptos previamente, se enfrentan con alguna notación desconocida o poco trabajada por ellos.

En la actividad experimental se emplearon TIC, las cuales consistieron en un sensor de posición, un carro de roce despreciable, una pista de aluminio, una interface y un software que permite la toma de datos en tiempo real y su respectiva representación. El uso de estos dispositivos favorece el aprendizaje y resulta motivador en los jóvenes debido al alto grado de alfabetización digital que poseen (Raviolo, Álvarez, y Aguilar 2011; Salinas, 2004).

Luego de discutir los distintos movimientos y vincular las distintas notaciones empleadas en las dos disciplinas involucradas en la experiencia, se explicó brevemente el funcionamiento de cada dispositivo y se les entregó a los alumnos en forma impresa una tarea que consistía en aplicar lo trabajado previamente. La misma comenzaba con un ejemplo que fue realizado experimentalmente y que consistió en generar un movimiento a velocidad constante a partir de la pista en posición horizontal. Luego los estudiantes, tomando el ejemplo presentado y las ideas discutidas previamente, debían completar los gráficos de aceleración en función del tiempo y el de posición en función del tiempo. Los alumnos podían resolver la actividad en forma individual y/o grupal y consultando a los docentes, de esta manera se trabajó entre los distintos actores que formamos parte de la experiencia.

El objetivo era analizar una expresión desde un punto de vista físico y matemático a partir del análisis de una función. Es así que, a partir de este análisis surge la vinculación entre la derivada primera y segunda (desde la matemática) con la velocidad instantánea y con la aceleración instantánea (desde la física).

Para concluir con la actividad, se empleó el sensor de posición que permitió obtener los datos necesarios para construir la expresión de la posición en función del tiempo del carrito que realiza un movimiento con aceleración constante. El resultado de esta toma de datos permitió obtener una función cuadrática dando la posibilidad que el alumno contraste el gráfico realizado por él con el generado experimentalmente y verificar que el gráfico experimental se ajusta al obtenido por el modelo teórico (Figura 1).

Cabe mencionar que la experiencia realizada con el sensor de posición forma parte del primer laboratorio que los estudiantes hacen cuando cursan la asignatura Física I.



**FIGURA 1.** Distintos momentos del desarrollo de la actividad de articulación en el aula de matemática

Los alumnos pudieron resolver algunas de las consignas dejando otras en blanco (que creemos se debe por el tiempo al que se destinó la actividad, el cual resultó escaso). Algunos hicieron referencia a recuerdos que tenían de física por su paso en la escuela media y otros con lo visto en Matemática A y la presentación realizada por los docentes de Física I en la actividad propuesta.

Por la experiencia en el aula se puede concluir que la propuesta de actividades resultó útil y motivadora, lo cual se constata con los resultados obtenidos por una encuesta realizada a los alumnos una vez entregadas sus producciones, la cual fue realizada con el objetivo de contar con herramientas que permitieran analizar la actividad desarrollada. Se pudo observar gran interés y esfuerzo por gran parte de los estudiantes para resolver los problemas propuestos, manifestándose el espíritu de colaboración entre los compañeros. Se observó un buen trabajo en equipo y una gran motivación, principalmente porque se logró un ámbito de discusión ameno para la resolución de las situaciones problemáticas que se les presentaron.

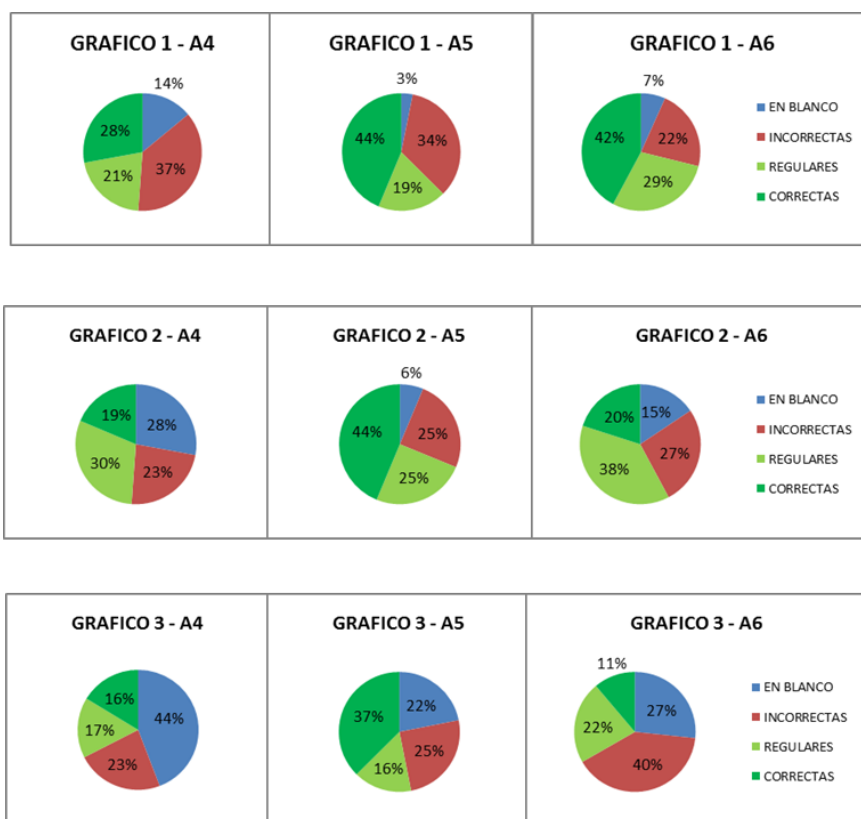
## RESULTADOS

Los resultados de la encuesta realizada a los alumnos que participaron de la actividad, luego de su finalización, dieron los siguientes valores: el 76% de los alumnos encuestados respondieron que habían estudiado el movimiento rectilíneo uniforme (MRU) y uniformemente variado (MRVU) en alguna de las materias del secundario. Solamente el 34% de los estudiantes consideró que la vinculación entre los temas vistos en Matemática A con los conceptos sobre el movimiento en una dimensión mostrados en la experiencia podrían haberla realizado sin la intervención del docente. Al 97% de los estudiantes les pareció importante que se brinden actividades en las que puedan vincular la matemática con situaciones experimentales.

Luego de un tiempo de llevada a cabo la experiencia relatada, se hizo una encuesta de carácter anónimo a tres comisiones de alumnos de Matemática A, entre los cuales se encontraban los estudiantes del curso A5, grupo que había realizado la actividad experimental. El objetivo de ésta fue evaluar el aprendizaje entre el análisis de una función y la cinemática unidimensional.

En la encuesta se les solicitó que respondieran sobre representaciones gráficas de posición, velocidad y aceleración en función del tiempo, de movimientos unidimensionales con aceleración constante.

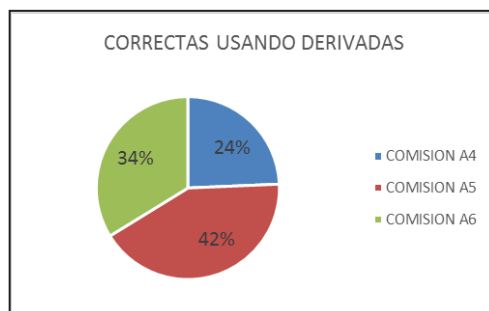
Se analizaron los resultados obtenidos y se representan en diagramas que se pueden observar en la Figura 2. Haciendo una comparación entre las tres comisiones de alumnos de Matemática A llamadas A4, A5 y A6, observamos que el grupo de estudiantes que tiene el mayor porcentaje de respuestas correctas es el A5, que es aquel que ha formado parte de la actividad experimental. Consideramos esperado este resultado ya que la incorporación de TIC motiva a los estudiantes logrando que participen en forma activa en el aula. Además, esta herramienta permitió que los alumnos pudieran aplicar los conceptos vistos en matemática de una manera abstracta en una situación de la vida cotidiana, analizando conceptos como velocidad y aceleración. Se puede apreciar que la menor diferencia se encuentra en el gráfico 1, esto no es casual ya que el resultado presentado en el mismo responde a considerar la velocidad constante que es, generalmente, donde los alumnos presentan menor dificultad por ser el movimiento más trabajado por ellos en el nivel medio.



**FIGURA 2.** Resultado de las respuestas de los estudiantes de Matemática A de tres comisiones distintas

La última pregunta realizada a los estudiantes en la encuesta anónima era: para justificar el comportamiento de las representaciones gráficas, ¿utilizaste de alguna manera el concepto de derivada? Los resultados obtenidos se analizaron y en la Figura 3 se representa el porcentaje de alumnos que no sólo utilizaron este concepto sino que también lo aplicaron correctamente. En dicho gráfico se comparan las respuestas de las tres comisiones. Se puede observar que los estudiantes del grupo que habían realizado la experiencia áulica con docentes de matemática y física, son los que en mayor porcentaje contestaron correctamente. Esto indicaría que la actividad experimental permitió que los alumnos conecten los conceptos desde las dos disciplinas.





**FIGURA 3.** Porcentaje de alumnos que respondieron correctamente aplicando el concepto de derivada

## CONCLUSIONES

En este trabajo se propuso articular mediante una actividad experimental, contenidos de física y matemática con el objetivo de lograr un aprendizaje significativo en los estudiantes. Los temas que se vincularon fueron el análisis de una función de una variable desde la matemática y conceptos de cinemática, desde la física.

El empleo de TIC en esta actividad resultó muy motivadora para los alumnos, lo que podría deberse al alto grado de alfabetización digital que ellos poseen, lo cual se observó por la gran participación de los estudiantes a la hora de realizar de la experiencia.

A partir de los resultados de las encuestas se pudo observar que la realización de esta actividad de articulación favoreció el aprendizaje entre el análisis de una función y cinemática unidimensional. Se trabajó sobre la integración de los conceptos mencionados de las dos asignaturas que generalmente queda en mano de los alumnos, y los resultados mostraron la necesidad que ellos mismos manifiestan sobre el hecho de que los docentes ayuden a vincular los conceptos de ambas disciplinas.

Consideramos que actividades de este tipo favorecen la ejercitación de habilidades que se requieren en la formación de un ingeniero tales como la interpretación de gráficos, el uso de nuevas tecnologías, el trabajo en equipo, el desarrollo de expresión escrita y la competencia de retomar temas aprendidos y aplicarlos en nuevos contextos.

Esta experiencia permitió valorizar la matemática como una herramienta que el futuro ingeniero deberá aplicar en su actividad como profesional.

A partir de los resultados positivos que se obtuvieron, se propone extender la experiencia a otras las comisiones de Matemática A.

## REFERENCIAS

- Alfaro-Carvajal, C., & Fonseca-Castro, J. (2016). La teoría de los campos conceptuales y su papel en la enseñanza de las matemáticas. *Uniciencia*, 30(1), 17-30.
- Ausubel, D. P.; Novak, J. D.; Hanesian, H. (1976). *Psicología educativa: un punto de vista cognoscitivo*. Vol. 3. Trillas, México.
- Costa, V.; Torroba, P.; Devece, E. (2013). Articulación en la enseñanza en carreras de ingeniería: el movimiento armónico simple y las ecuaciones diferenciales de segundo orden lineal. *Latin American Journal of Physics Education*, vol. 7 (Nº3): pp. 350-356.
- Devece, E., Di Domenicantonio, R., Torroba, P., Trípoli, M. (2015). Experiencia de articulación entre Matemática A y Física I. *Actas IV Jornadas de Enseñanza e Investigación Educativa en el campo de las Ciencias Exactas y Naturales Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación*. 28-30 de octubre de 2015. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. La Plata. Universidad Nacional de La Plata.



Raviolo, A.; Álvarez, M. y Aguilar, A. (2011). La hoja de cálculo en la enseñanza de la Física: recreando simulaciones. *Revista de Enseñanza de la Física*, 24 (1), pp. 97-107.

Salinas, J. (2004). Innovación docente y uso de las TIC en la enseñanza universitaria. *Revista Universidad y Sociedad dl conocimiento*, 1 (1), 16p.

Torroba P., Costa V. A., Devece E. (2013). Conceptualización de temas enmarcados en la Mecánica Clásica, en Electromagnetismo y en Ecuaciones Diferenciales Ordinarias a partir de una experiencia de articulación en una clase de matemática en carreras de ingeniería” *XI Conferencia Interamericana sobre Enseñanza de la Física*, 1-5 de julio 2013, Guayaquil, Ecuador.

Torroba P., Costa V. A., Devece E. (2014). Evolución de los conceptos vinculados en la enseñanza: sistema masa-resorte y ecuaciones diferenciales ordinarias. Una investigación en el contexto de una facultad de ingeniería. *XII Simposio de Investigación en Educación en Física*. 22-24 de octubre. Tandil. Argentina.

## DISEÑO DE UN DISPOSITIVO PARA LA ENSEÑANZA DE MODELOS QUE DESCRIBEN FLUIDOS EN MOVIMIENTO

Devece Eugenio<sup>1,4</sup>, Torroba Patricia<sup>1</sup>, Mendoza Zélis Pedro<sup>2</sup>, Czerwien Juan Carlos<sup>3</sup>, Aquilano Luisina<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IMApEC, Dpto. de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 1 y 47, La Plata, Argentina. [eugdvc@gmail.com](mailto:eugdvc@gmail.com)

<sup>2</sup>Departamento de Física, IFLP UNLP CONICET.

<sup>3</sup>Dpto. de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 1 y 47, La Plata, Argentina.

<sup>4</sup>IEC-EMIPACIVA-FRLP-UTN.

### Resumen

En este trabajo se presenta un dispositivo denominado generador de flujo variable que se diseñó para la enseñanza de modelos que describen el comportamiento de fluidos ideales en movimiento. Este instrumento genera un flujo en una cañería y permite controlar su velocidad en una dada sección de dicha cañería. De manera complementaria, se propone un laboratorio que emplea este dispositivo para determinar la velocidad de un fluido dentro de una cañería utilizando un tubo de Venturi y un manómetro. Se emplea un caudalímetro para contrastar los resultados y validar los modelos físicos involucrados.

Palabras claves: fluidos, Bernoulli, manómetros, caudalímetro, tubo de Venturi.

### INTRODUCCIÓN

Actualmente la homologación de los métodos de enseñanza en las Universidades es evaluada por algunos organismos nacionales que acreditan la calidad educativa impartida. Esto incluye la revisión de los contenidos y metodologías, reforzando la adquisición de competencias afines a la profesión de ingeniería así como aquellas referidas a su vinculación con la sociedad. En el área de física se trabaja con el propósito de fortalecer la formación experimental en los estudiantes [Pesa, Bravo, Pérez, 2012] y el laboratorio constituye un medio adecuado para ejercitar habilidades tales como interpretación de resultados, análisis de las incertidumbres de medida, elaboración de informes y conclusiones, manejo de la comunicación oral y escrita.

Dentro de la cátedra de Física I del Departamento de Ciencias Básicas, se realizan actividades de diseño y desarrollo de dispositivos didácticos para la enseñanza de Física (Torroba, Devece, Trípoli, Aquilano 2016; Devece, Torroba, Videla 2015; Costa, Torroba, Devece 2013)

Con el objetivo de favorecer el entendimiento de los modelos que describen fluidos ideales en movimiento, se diseñó un dispositivo denominado *generador de flujo variable*. La construcción de este material didáctico estuvo motivada en mostrar a los alumnos una aplicación concreta de las ecuaciones de Bernoulli y de continuidad (Tipler 2001; Serway 1999; Sears, Zemansky, Young 1999). El dispositivo consiste de una turbina, un tubo de Venturi y un manómetro. Este aparato es de bajo costo, está hecho de material reciclable, es fácilmente

transportable, tiene bajo peso y su parte electrónica está compuesta por elementos de fácil acceso en el mercado actual.

En este trabajo se presenta el generador de flujo variable construido y un laboratorio de ejemplo cuyo objetivo es medir la velocidad del aire en un tubo de Venturi.

Los valores de las magnitudes físicas involucradas fueron relevados a través de un caudalímetro y contrastados con este aparato.

### Sistema generador de Flujo variable

El generador de flujo variable desarrollado para estudiar fluidos ideales en movimiento se muestra en la Figura 1. Se puede observar que está compuesto por cuatro partes fundamentales que se describen a continuación.

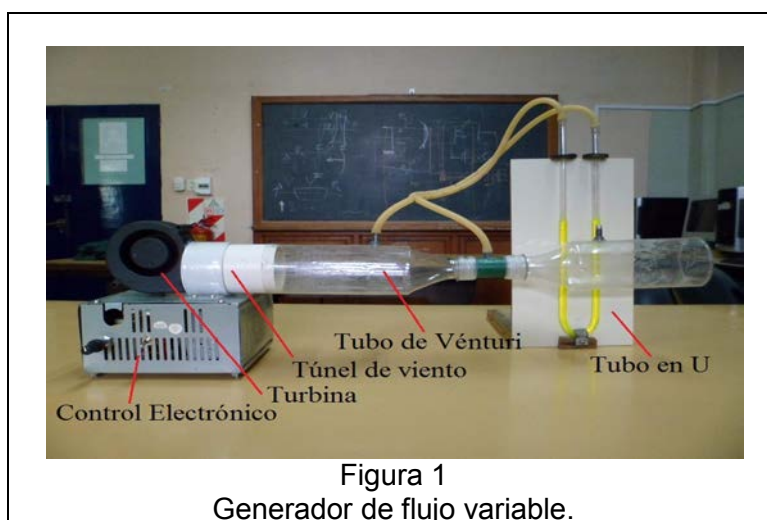


Figura 1  
Generador de flujo variable.

*Turbina:* Es un dispositivo impulsor de aire, que toma aire a presión atmosférica y velocidad nula, convirtiéndola en un flujo con mayor velocidad y menor presión.

*Túnel de Viento:* Dispositivo encargado de propulsar el paso de aire o gas para ser enviado hacia otro medio para su posterior estudio. Además, acondiciona el aire al modelo laminar, muy importante para realizar estudios de laboratorio.

*Tubo de Venturi:* Es un dispositivo que origina una pérdida de presión al pasar por él un fluido. En esencia, éste es una tubería corta recta, o garganta, entre dos tramos cónicos. La presión varía en la proximidad de la sección estrecha; así, al colocar un manómetro o instrumento registrador en la garganta se puede medir la caída de presión y calcular el caudal instantáneo, en donde su parte ancha final actúa como difusor.

*Manómetro:* Se utiliza comúnmente para medir la presión en los puntos de prueba.

### Control Electrónico para variación de flujo

En las Figuras 2 y 3 se observa el panel frontal y la vista trasera del sistema electrónico de control de flujo.

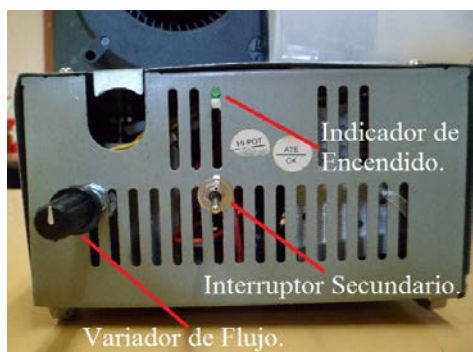


Figura 2

Panel Frontal del Control Electrónico.



Figura 3

Vista de la parte trasera del Control Electrónico.

### Circuitos eléctricos del Control Electrónico

En el mercado local se obtuvieron Turbinas especiales denominadas *sopladores*. Se deseaba en principio, variar su flujo desde *velocidad nula* hasta su *máximo valor*, lo cual se lograría al variar la tensión de alimentación. Ello no se pudo implementar, dado que su tensión nominal de alimentación comprende el rango (12V a 14V). Al ser controlado internamente por un circuito de protección, no se puede disminuir su tensión a un valor menor de 9 V, caso contrario se producía la rotura de los mismos. Se diseñó un circuito que varía la velocidad desde los 9 Volts hasta los 16 Volts (*valor mínimo y máximo tolerable para el motor*) por medio de un potenciómetro. Dicha variación se realiza mediante la técnica de PWM (*Modulación por Ancho de Pulso*) permitiendo variar la Potencia del motor, logrando de esta manera mantener proporcional el torque, incluso a velocidades mínimas. El rango de tensión seleccionado que optimiza la vida útil del dispositivo, surgió después de un trabajo de investigación sobre dichos sopladores, a partir de la realización de numerosos ensayos.

### Fuente de alimentación de 18 Volts de C.C.

La fuente de alimentación resulta muy sencilla como se puede observar en la Figura 4. Los puntos de inspección, consisten en pines (colocados en el circuito impreso) con la finalidad de ajustar la tensión de alimentación de la turbina, dado que las mismas (*a pesar de pertenecer al mismo fabricante*) poseen tolerancias mínimas, con lo cual, varían su tensión nominal de alimentación y por ende el flujo que generan. Las tensiones varían desde 15 Volts hasta los 25 Volts con incrementos de aproximadamente 0.7 volts. Además, el diseño permite ingresar (si es deseado) con tensiones continuas en el rango de 18 a 25 Volts. Estos voltajes son necesarios para ajustar la tensión nominal de trabajo de los sopladores, dado que por tolerancias de fabricación los mismos varían su tensión nominal de trabajo.

La Figura 5 ilustra el circuito que ha sido diseñado para variar la velocidad desde los 9 Volts hasta los 16 Volts (*valores mínimos y máximos tolerable para el motor*) por medio de un potenciómetro, como se describió anteriormente.

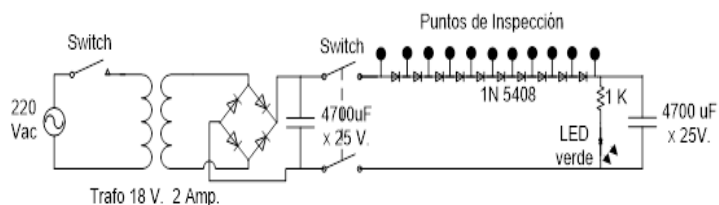


Figura 4.  
Fuente de alimentación

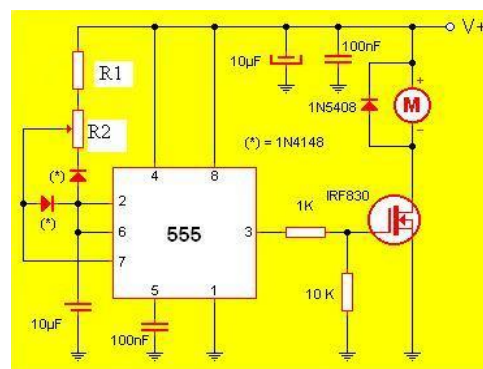


Figura 5.  
CV PWM

### Ventilador Soplador (Turbina), Especificaciones Técnicas

En la Figura 6 se observa el Ventilador Soplador (Turbina) y en la Tabla 1 las características Eléctrica y Mecánicas.



Figura 6. Ventilador Soplador.

Las especificaciones generales son:

- Motor DC sin escobillas.
- Soplador ultra silencioso con velocidad de arranque suave.
- Construido con lámina de material termoplástico UL94V-0 PBT.
- Material de la carcasa: termoplástico UL PBT.



Figura 7. Equipo apagado igual Nivel en las ramas.



Figura 8. Equipo encendido, se observa el desnivel en las ramas.

### Funcionamiento del Generador de Flujo Variable

Luego de encender el dispositivo, una vez que se encuentra en régimen estable, se puede variar el flujo de aire que entrega el sistema. Esto se logra simplemente girando a izquierda o a derecha la perilla del *Variador de Flujo*, mostrada en la Figura 2. Al practicar la operación comentada anteriormente, se observa una variación en las alturas de la columnas en el Manómetro tipo **U**, como se ilustran en las Figuras 7 y 8.

### Práctica de Laboratorio: Determinación de la velocidad en un fluido

Utilizando el dispositivo presentado es posible implementar una práctica de laboratorio cuyo objetivo sea determinar la velocidad de un fluido dentro de una cañería utilizando un tubo de Venturi y un manómetro.

El laboratorio consiste en la medida de la diferencia de alturas de columnas observadas en la Figura 8, para diferentes velocidades de circulación del fluido que justamente serán determinadas en el laboratorio. En función de la diferencia de altura, los alumnos determinarán la velocidad del fluido aplicando las ecuaciones de continuidad y de conservación de la energía (Bernoulli). En el laboratorio también puede servir para aplicar los conceptos relacionados con la propagación de incertidumbres.

A modo de control, hemos realizado estas medidas y contrastados los resultados con medidas realizadas con un caudalímetro, encontrando un buen acuerdo entre ambas metodologías.

### CONCLUSIONES

El generador de flujo variable favorece el entendimiento de los modelos que describen fluidos ideales en movimiento. Si se usa para mostraciones en clase, permite contrastar la predicción sobre el comportamiento del fluido con el resultado experimental, dando validez al modelo físico empleado. La actividad de laboratorio genera un espacio para que los estudiantes ejerciten habilidades tales como interpretación de resultados, análisis de las incertidumbres de medida, elaboración de informes y conclusiones, manejo de la comunicación oral y escrita. Por otro lado, a partir de los resultados medidos y contrastados con el caudalímetro, el laboratorio resulta otro camino para validar las suposiciones y aproximaciones consideradas cuando se modela al fluido. De manera indirecta, con la actividad experimental se acerca a los alumnos a un nuevo instrumento de medida, el caudalímetro, que es muy usado en la industria.



Las características del dispositivo desarrollado hicieron que se pueda replicar y sea usado no sólo para mostración en clase, sino como una herramienta en los laboratorios realizados por los alumnos.

### Referencias

- Costa, V.; Torroba, P.; Devece, E. (2013). Articulación en la enseñanza en carreras de ingeniería: el movimiento armónico simple y las ecuaciones diferenciales de segundo orden lineal. *Lat. Am. J. of Phy. Educ.* vol. 7 (Nº3): pp. 350-356.
- Devece, E., Torroba, P., Videla, F. (2015). El empleo de las TIC para validar los modelos teóricos en el estudio del movimiento de rototraslación. *Revista de la Enseñanza de la Física*, vol 27, p.p. 411-417.
- Pesa, M., Bravo, S. y Pérez, S. (2012). La importancia de las actividades de laboratorio en la formación de ingenieros. *Memorias del Decimoprimer Simposio de Investigación en Educación en Física*. Sief XI Esquel, Argentina.
- Resnick, R., Halliday, D. y Krane, K. 2008. *Física, Volumen 1*, Quinta edición. (C.E.C.S.A., México)
- Sears, Zemansky, Young. *Física universitaria, Volumen I*. 9ª.ed. 1999;
- Serway, R. A.: *Física, Vol. I*, tercera o cuarta edición. (Mc Graw-Hill, México) (1999)
- Tipler, P. A. *Física*, primera y cuarta edición. (Editorial REVERTÉ, Barcelona) (2001)
- Torroba, P., Devece, E., Trípoli, M., Aquilano, L. (2016). Cinemática y el análisis de una función: una propuesta didáctica para su articulación en el contexto de una Facultad de Ingeniería. *Revista de la Enseñanza de la Física*, vol 28, p.p. 91-99.

## DESARROLLO DE INTERFAZ PARA SENSOR DE TEMPERATURA PASCO CON TECNOLOGÍA ARDUINO EN REEMPLAZO DE INTERFAZ PASCO (MODELO SCIENCE WORKSHOP 750)

Devece Eugenio<sup>1,2</sup>, Czerwien Juan Carlos<sup>1</sup>, Bottcher Axel<sup>1</sup>, Torroba Patricia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UIDET IMApEC, , Dpto. de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 1 y 47, La Plata, Argentina. [eugdvc@gmail.com](mailto:eugdvc@gmail.com)

<sup>2</sup>IEC EMEIPACIBA, FRLP. UTN

### Resumen:

Este desarrollo surge en el grupo de trabajo de la UIDET IMApEC, Facultad de Ingeniería, UNLP, en base al requerimiento de un grupo de trabajo del Laboratorio de Enseñanza de Física (LEF) de la Facultad de Ciencias Exactas, UNLP, de realizar una revisión (**desde el punto de vista de Ingeniería Electrónica (hardware) y de Desarrollo de Software**) de varios dispositivos y sistemas, entre ellos el reemplazo de interfaces PASCO (MODELOS Science Workshop 750 o 500), por interfaces desarrolladas con Tecnología ARDUINO, a fin de utilizar los sensores de temperatura PASCO disponibles en el LEF. Estos sensores se encuentran en óptimo estado de funcionamiento, sin embargo no pueden ser utilizados por el deterioro de las interfaces PASCO. Éstas, están actualmente en desuso, por un lado debido al uso intensivo y por otro, a causa del avance de la Tecnología, la cual ha causado *obsolescencia programada*. A lo largo de todo el proceso de construcción del dispositivo se emplearon contenidos adquiridos en la carreras de Ingeniería Electrónica e Informática, aplicada a la situación particular de la interfaz, solicitada por Investigadores del área Física (LEF) Facultad de Ciencias Exactas UNLP.

**Palabras clave:** reemplazo de equipos obsoletos, sensores de temperatura, desarrollo de software y hardware, tecnología ARDUINO

### INTRODUCCION

Las interfaces PASCO que se muestran en la Figura 1, presentan una gran dificultad de reposición, por sus altos costos y necesidad de importación. Los alumnos de Ciencias Exactas utilizando Tecnología ARDUINO de fácil adquisición y bajo costo en el mercado local, (Christiansen, Hanna, Aguero, Pereyra 2016), (Martinazzo ; Trentin ; Ferrari ; Piaia 2014), (Galeriu,(2013). (Galeriu, 2014). (Rodrigues, Souza Cunha 2014); hicieron un primer desarrollo para la adquisición de datos a través de una interfaz Hardware-Software desarrollada con dicha Tecnología para la reutilización de sensores de temperatura (PASCO CI-6505A). Este desarrollo requería mejoras de diseño para un buen funcionamiento y además era necesario incluir una interfaz gráfica amigable para el usuario.

Para realizar la mejora se utilizó como interfaz de Hardware la *Tecnología ARDUINO* para digitalizar la señal e ingresarla a una PC, a través de un puerto USB, y posteriormente calibrarla. La calibración de la interfaz desarrollada se hizo mediante un termómetro de temperatura patrón diseñado en la UIDET IMAPEC (con la Tecnología ARDUINO MEGA 2560 R3). También se desarrolló una interfaz gráfica para la visualización de los datos y su posterior análisis en un documento de Microsoft Excel. Este tipo de almacenamiento permite a los usuarios manipular y analizar los datos en forma independiente de la PC de adquisición.

En el trabajo se presentaran los detalles de las distintas etapas del desarrollo.

Unidades a reemplazar:



Figura 1.

Imágenes de las interfaces PASCO 500 y 750 que son reemplazadas por tecnología ARDUINO

### Adaptación del Sensor de Temperatura PASCO Modelo CI-6605A Analógico para trabajar con un dispositivo Digital.

El sensor de temperatura PASCO Modelo CI-6605A de acero inoxidable (Figura 2), consiste en un termistor del tipo analógico construido en un tubo de acero inoxidable, el cual permite medir valores de resistencia en el rango de los Kohms. Ello es posible ya que el conector DIN de 8 pines posee internamente un circuito electrónico del tipo *Analógico*, formado por una tensión de referencia y una resistencia (de alta precisión) utilizada como referencia para las mediciones. El rango de trabajo es de  $-35^{\circ}\text{C}$  a  $+135^{\circ}\text{C}$  cuya precisión es de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Posee una cubierta de teflón necesaria para medir temperaturas en reacciones químicas.

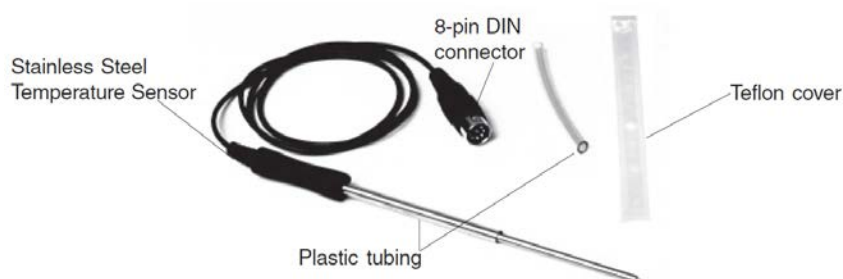


Figura 2.

Sensor de temperatura PASCO, Modelo CI-6605A de acero inoxidable. Sonda de temperatura de conexión directa.

### Circuito y disposición de pines de la ficha DIN 8

La Figura 3, ilustra la ficha DIN de 8 pines, de los cuales se utilizan 5 de ellos, dos para la fuente de alimentación a  $\pm 12\text{V}$ , una para la toma a tierra (GND) y dos para las salidas de voltaje positivos y negativos del tipo *analógico* ( $A+$  y  $A-$ ). Para hacer uso del Sensor de temperatura (PASCO CI-6505A), se debió procesar ambas señales analógicas y convertirlas en digital, lo que generó una ardua tarea para su desarrollo. La digitalización se logró gracias a la implementación de la tecnología ARDUINO, utilizando las entradas de voltaje analógicos A0 y A1 en dicho dispositivo.

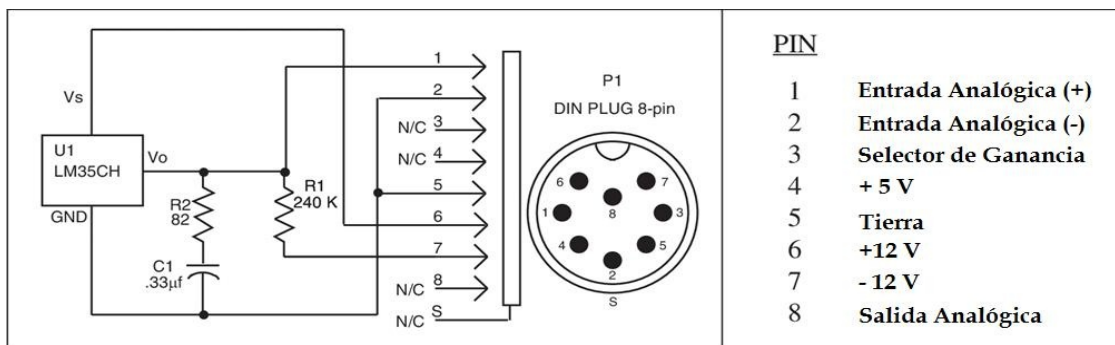


Figura 3.

Esquema del circuito electrónico del sensor de temperatura, y disposición de pines de la ficha DIN de 8 pines.

### Sensor de temperatura PASCO en modo "Full-Range"

El sensor de Temperatura puede operar en dos modos: "Normal" (0°C a +135°C) y "Full Range" (-35°C a +135°C) ambas con una exactitud de 0.5 °C. Al utilizarse en el modo *Full Range*, mediante la Tecnología ARDUINO, (utilizando la ecuación de ajuste de temperatura sugerida por el fabricante), su lectura analógica era muy inestable, por lo que no se pudo utilizar. Generamos un nuevo código, del cual a su vez, debimos promediar los valores obtenidos. Se determinó (de manera práctica, sujeta a la correspondiente teoría) que realizando 500 lecturas, seguida de su promedio, se obtenía una buena relación entre precisión y velocidad de cálculo. La calibración y verificación de la interfaz desarrollada se realizó con el sensor de Temperatura diseñado en la UIDET IMAPEC (con la Tecnología ARDUINO MEGA 2560 R3).

La respuesta del Sensor en todo su rango, no era lineal, por lo que se debió obtener los coeficientes de la ecuación de linealización mediante el método de *regresión lineal con el método de mínimos cuadrados*, para lo cual se utilizó el *software Matlab*. Luego de su implementación, la lectura se aproximó muy bien respecto del sensor de referencia que utilizamos para contrastar los resultados obtenidos.

### Ecuación dada por el Fabricante para la Linealización del Sensor PASCO

```
float Thermistor(int Raw) //This function calculates temperature from ADC count
{
  /* Inputs ADC count from Thermistor and outputs Temperature in Celsius. This version
  utilizes the Steinhart-Hart Thermistor Equation: Temperature in Kelvin = 1 / {A + B[ln(R)] +
  C[ln(R)]^3}. for the themistor in the Vernier TMP-BTA probe:
  * A =0.00102119 , B = 0.000222468 and C = 1.33342E-7
  long Resistance;
  float Resistor = 15000; //fixed resistor
  // the measured resistance of your particular fixed resistor in
  // the Vernier BTA-ELV and in the SparkFun Vernier Adapter Shield
  // is a precision 15K resistor
  float Temp; // Dual-Purpose variable to save space.
  Resistance=( Resistor*Raw /(1024-Raw));
  Temp = log(Resistance); // Saving the Log(resistance) so not to calculate it 4 times later
  Temp = 1 / (0.00102119 + (0.000222468 * Temp) + (0.000000133342 * Temp * Temp *
  Temp));
  Temp = Temp - 273.15; // Convert Kelvin to Celsius
  return Temp; // Return the Temperature
}
```

## Procesamiento de la señal analógica del Sensor PASCO

Se desarrolló un código para realizar la lectura de los valores analógicos del sensor. Estos son convertidos al formato digital, luego se promedian y finalmente se obtienen de esta manera las lecturas de cada valor de temperatura.

```
int i; // Declaro variable tipo entero.

for(i=0;i<MAX_AV_READ;i++) // Bucle FOR.
{
  TC0 = TC0 + analogRead(A0) ;// Lectura (pin +out) del sensor.
  delay(3); // ATMEGA necesita al menos 10uS de retardo, Prefiero 3
uS.
  TC1 = TC1 + analogRead(A1) ;// Full Range, escala -55 to + 155 C
} // Lectura (pin -out(virtual Vss) ) del sensor.
TC0 = TC0 / MAX_AV_READ; // Promedio.
TC1 = TC1 / MAX_AV_READ; // Promedio.
TCalc = TC0 - TC1 ; // Resta (MATEMÁTICA) respecto de tierra virtual.
TCalc1 = TC0 - TC1 ; // Resta (MATEMÁTICA) respecto de tierra virtual.
Calculo de Grados Centígrados.
TCalc = ( TCalc/1024.00 ) * 5.00 * 100.00 ) - FCORR;
```

## Ecuación de ajuste

Se realiza la linealización del sensor utilizando regresión lineal por el método de mínimos cuadrados para ser implementado en el modo "Full Range", cuyos coeficientes fueron calculados mediante el Software Matlab.

$$T_{Calc} = ( ( T_{Calc} * 1.011361862295329 ) + 4.034796779828901 );$$

En la Figura 4, se puede observar: En color rojo, la curva del sensor de referencia (Patrón) , en color verde la curva del Sensor PASCO y en color azul, la curva Sensor PASCO Linealizado.

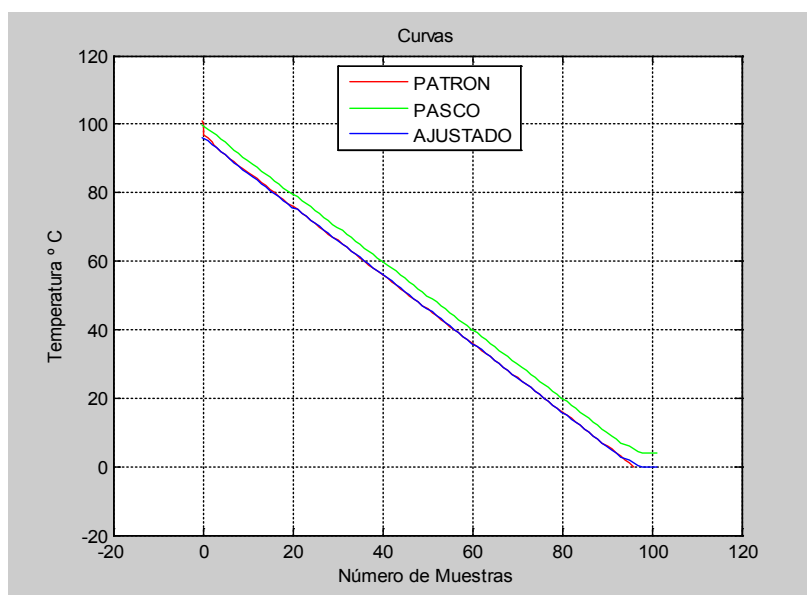


Figura 4

Comparación de la curva patrón (Rojo), Sensor sin Linealizar (Verde) y Sensor PASCO Linealizado (Azul)



### Detalle de las diferentes partes del sistema

En la Figura 5 se ilustra la vista Frontal del Sistema de Adquisición de datos de Temperatura implementado para los Sensores PASCO CI-6505A .

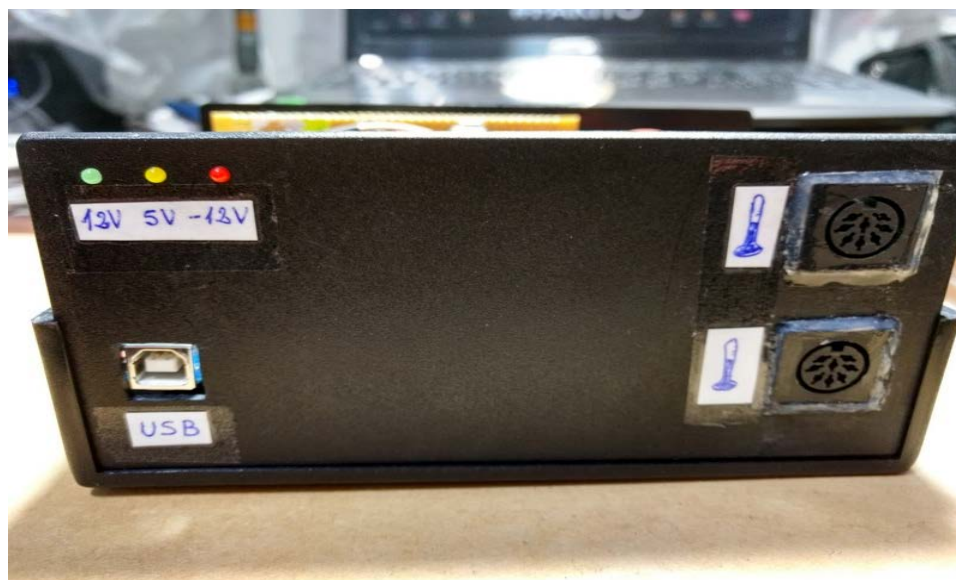


Figura 5  
Vista frontal del sistema electrónico de adquisición de datos de Temperatura para Sensores PASCO CI-6505A.

### Sistema de Adquisición de Datos

En la Figura N 6 se ilustra la vista interior del Sistema de Adquisición de datos de Temperatura implementado para los Sensores PASCO CI-6505A.

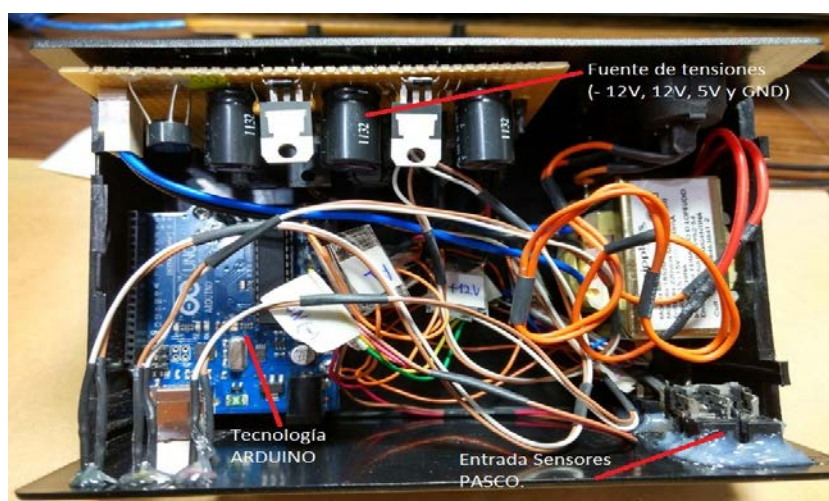


Figura 6  
Vista interior del Sistema de Adquisición, Identificando cada Bloque Funcional



## Interfaz gráfica desarrollada

Se desarrolló una interfaz gráfica para la visualización de los datos y su posterior análisis en un documento de Microsoft Excel. La Figura 7 muestra el sistema de adquisición en el modo de PAUSA, luego de realizar la toma de datos de Temperatura.

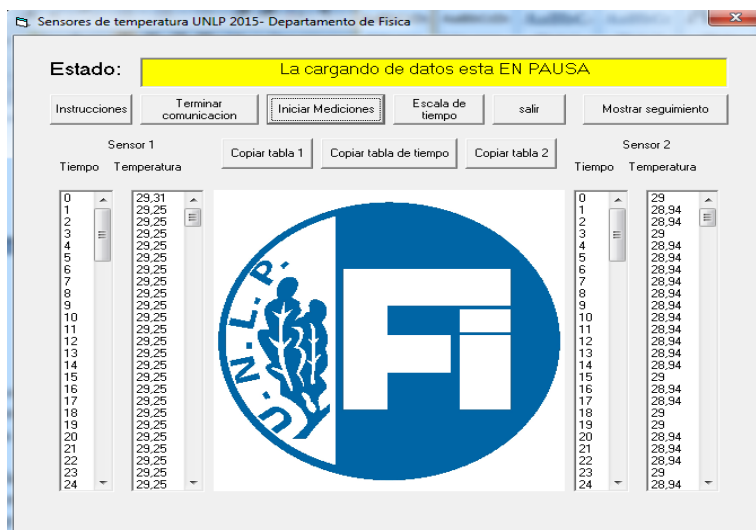


Figura 7

Sistema de adquisición de datos de Temperatura en el modo de PAUSA.

## CONCLUSIONES

El desarrollo de la interfaz ARDUINO permitió poner en valor los sensores descartados por no contar con la interface requerida PASCO, ya sea por obsolescencia programada o por defectos propios del uso. Los materiales utilizados en su construcción son de bajo costo y se encuentran disponibles en el mercado local. Además, se desarrolló software propio, sin descartar el software propio del sensor, ya sea Data Studio, Science Workshop, etc. Por otro lado, este trabajo generó un espacio para que los becarios ejerciten habilidades tales como montaje, desarrollo de software y de hardware estudiadas en las carreras de ingeniería. Finalmente, este desarrollo posibilitó la generación de material didáctico para usar tanto en los laboratorios como en mostraciones en clases.

## Agradecimiento

Se agradece a la Prof. G. Punte y a los alumnos de Ciencias Exactas L. Gutierrez y E.L. Pereyra por habernos provisto la oportunidad de realizar el desarrollo.

## Referencias

- Christiansen R., Hanna F., Agüero E., Pereyra N. (2016). Experimentos de física utilizando Arduino. *Revista de Enseñanza de la Física*, 28 (1), pp. 23-28
- Claodomir A. Martinazzo ; Débora S. Trentin ; Douglas Ferrari ; Matheus M. Piaia (2014). *Arduino: Uma tecnologia no ensino de Física. Arduino: a technology in teaching physics.* URI-Erechim. Brasil.
- Galeriu, C. (2013). An Arduino-controlled photogate. *The Physics Teacher*, 51(3), 156-158.
- Galeriu, C. (2014). An Arduino investigation of simple harmonic motion. *The Physics Teacher*, 52 (3), 157-159.
- Rafael F. de Rodrigues, Silvio L. Souza Cunha (2014). *Arduino para físicos Uma ferramenta prática para aquisição de dados automáticos. Textos de apoio ao professor de Física*, v.25 n.4 2014.

## SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y ALMACENAMIENTO DE DATOS DE TEMPERATURA EN TIEMPO REAL, BASADO EN TECNOLOGIA ARDUINO

Devece Eugenio<sup>1,2</sup>, Torroba Patricia<sup>1</sup>, Czerwien Juan Carlos<sup>1</sup>, Bottcher Carlos Axel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>IMApEC, Dpto. de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 1 y 47, La Plata, Argentina. [eugdvc@gmail.com](mailto:eugdvc@gmail.com)

<sup>2</sup>IEC-EMIPACIVA-FRLP-UTN.

### Resumen

En este trabajo se presenta el desarrollo de un *Sistema de Adquisición de datos de Temperatura*, basado en tecnología Arduino; tanto la interfaz como el sensor. Este dispositivo permite a través de una PC de escritorio, adquirir los datos, ser leídos y graficados en tiempo real, en el mismo instante en que se está realizando la medición in-situ. Esta herramienta está pensada para ser utilizada en experiencias de termodinámica como: calorimetría, validación de la ley de enfriamiento de Newton, principio cero de la termodinámica, etc. Se muestran los resultados de una experiencia medidos con este dispositivo y con un sensor Vernier. A partir de la comparación entre ambos surge el buen desempeño del instrumento desarrollado. En el transcurso del desarrollo de esta herramienta se utilizaron los contenidos propios de las carreras de ingeniería electrónica e ingeniería en computación dadas en nuestra facultad. El resultado obtenido es un sistema de adquisición de datos que es utilizado como material didáctico en la cátedra de Física I.

Palabras clave: sensores, interfaz, tecnología Arduino, termodinámica.

### INTRODUCCIÓN

En la cátedra de Física I, del Departamento de Ciencias Básicas, se realizan una serie actividades que incluyen el diseño y desarrollo de dispositivos didácticos para la enseñanza de Física. A partir de la década del 80, dentro de las propuestas didácticas, se comenzó a incorporar en el aula el uso de la tecnología. Las investigaciones sobre el uso de estas tecnologías han demostrado que el empleo de estos instrumentos es motivadora y favorece la participación activa de los estudiantes, permite el planteo de hipótesis y la elaboración de conclusiones y los ayuda en el entendimiento conceptual de las ciencias (Raviolo, Álvarez, y Aguilar 2011; Salinas, 2004). En nuestra Facultad desde 1995, contamos con equipos que permiten adquirir datos en tiempo real, estos equipos constan de hardware y software, que por el uso o por obsolescencia programada, van quedando fuera de servicio. El empleo de las nuevas tecnologías en el ámbito de la enseñanza de las ciencias, hace que las actividades como los laboratorios y las prácticas que realizan los alumnos estén constantemente en proceso de revisión y actualización.

La reposición de los sensores Pasco y Vernier con que cuenta la cátedra presentan la dificultad de los altos costos y del proceso de importación. Surge entonces, la opción de diseñar y construir este tipo de elementos, tanto hardware, como software, con elementos que pueden ser adquiridos en el mercado local y a muy bajo costo (Christiansen, Hanna, Agüero, Pereyra (2016), Souza et al 2011, Galeriu, 2013, Galeriu, C. 2014). En particular, se desarrolló un *Sistema de Adquisición de datos de Temperatura*, basado en tecnología

Arduino; tanto la interfaz como el sensor. Esta herramienta está pensada para medir temperatura en tiempo real y ser utilizada en experiencias de termodinámica como: calorimetría, validación de la ley de enfriamiento de Newton, principio cero de la termodinámica, etc.

En este trabajo, a modo de ejemplo, se emplea este dispositivo para el tratamiento de la ley de enfriamiento de Newton (Resnik, 2008). Los datos de la temperatura se miden con el instrumento desarrollado con tecnología Arduino y con un sensor Vernier. A partir de los gráficos se valida el buen desempeño de la nueva herramienta.

### Sistema de adquisición de datos de Temperatura.

Este dispositivo se muestra en la Figura 1 y permite a través de una PC de escritorio, adquirir los datos, ser leídos y graficados en tiempo real. Luego de realizar la medición in-situ, los valores de temperatura se almacenan automáticamente en un documento de Excel, para su posterior análisis y estudio por parte del alumno.

Todo el control del sistema de adquisición se realizó a través de un software libre, desarrollado y adaptado específicamente al hardware, en lenguaje *Visual Basic 6.0*



Figura 1  
Sistema de Adquisición de datos de Temperatura

Las características relevantes del sistema de adquisición son:

- Conexión automática en cualquier puerto USB.
- Selección del tiempo de ejecución del experimento (rango desde 0.1 a 15 minutos).
- Exportación de Datos a documento de Excel (archivos .xlsx).
- Durante la ejecución del experimento, mediante una interface gráfica se pueden seleccionar dos opciones: Pausar o Detener las mediciones.
- Ventanas interactivas para el ingreso de valores (por parte del usuario).

Se puede observar en la Figura 1 que el instrumento está constituido por tres partes fundamentales:

- ✓ **Dispositivo (1).** Sistema de adquisición, lectura y muestra de datos en tiempo real.
- ✓ **Dispositivo (2).** Sondas de temperatura de alta precisión.

- ✓ **Dispositivo (3).** Línea de transmisión de datos con conexión hacia una PC de escritorio.

**Dispositivo (1):** Consiste en un sistema electrónico complejo, encargado de adquirir los valores de temperatura, procesarlos, visualizarlos y posteriormente transmitirlos a través de un canal de comunicación hacia una PC de escritorio.

**Dispositivo (2):** Termómetros digitales con las siguientes características:

- Tipo Sonda.
- Modelo sumergible para usar en exterior o en contacto con líquidos.
- Alta velocidad de respuesta, menor a 100 mseg.
- Alta precisión.
- Lectura de temperatura en grados Celsius, Fahrenheit o Kelvin Kelvin (el usuario puede escoger diferentes precisiones, 0.5 °C, 0.25 °C, 0.125 °C y 0.0625 °C con salidas digitales de 9, 10, 11 y 12 bits).
- Su temperatura operativa se encuentra entre -55 °C y 125 °C. La precisión, en el rango comprendido entre -10 y 85 grados es de 0.5 grados (precisión ajustable por el usuario).

**Dispositivo (3):** Cable USB de alta velocidad, que permite la transferencia de datos desde el sistema electrónico hacia la PC de escritorio, permitiendo de esta manera el almacenamiento de los mismos para ser procesados y analizados.

En las Figuras 2 y 3 se ilustran la vista Frontal y Lateral Derecha del Sistema de Adquisición de datos de Temperatura.



Figura 2  
Vista frontal del sistema electrónico de adquisición de datos de Temperatura.



Figura 3  
Vista Lateral Derecha del sistema electrónico de adquisición de Temperatura.

En la Figura 4 se muestra el interior del sistema de adquisición de datos, indicando cada una de las partes que lo componen.



Figura 4  
Vista interior del Sistema de Adquisición de datos, identificando cada bloque funcional

#### Características del Software de la Interface Gráfica

- Auto-escala automática del eje de Tiempos.
- Selección de repetición del experimento.
- Selección del tiempo de ejecución del experimento.
- Exportación de Datos (independiente para cada experimento realizado) a documento de Excel (archivos xlsx).
- Cada vez que finaliza un experimento, mediante un cuadro de diálogo se pueden seleccionar dos opciones: Continuar o Finalizar la Aplicación.
- Ventanas interactivas para el ingreso de valores (por parte del usuario) y Ventanas de Bloqueo por Valores fuera de rangos.

En la Figura 5 se muestra el sistema de adquisición en el modo de PAUSA, luego de realizar la toma de datos de Temperatura.



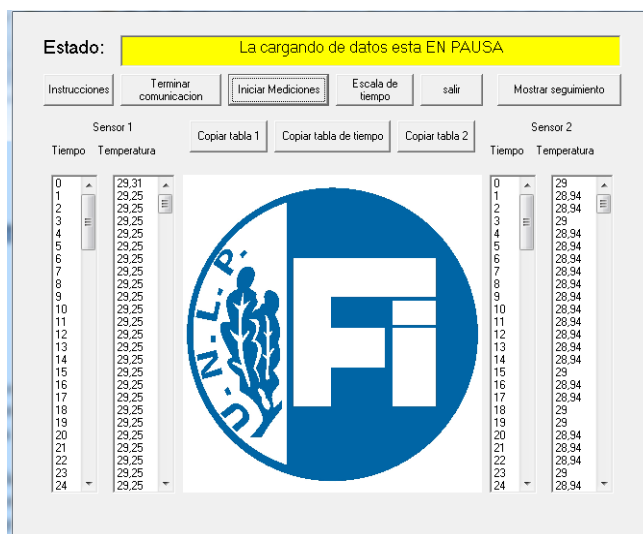


Figura 5.

Sistema de adquisición de datos de Temperatura en el modo *pausa* luego operar

### Resultados del uso de tecnología Arduino en el estudio de la Ley de enfriamiento de Newton

Con el objetivo de poner en práctica el dispositivo desarrollado, se lo empleó para estudiar la ley empírica de enfriamiento de Newton. La experiencia consistió en introducir un sensor de temperatura Vernier y el desarrollado con tecnología Arduino, en un recipiente con agua inicialmente a 74°C. Luego se agregó agua fría y el sistema llegó al equilibrio térmico, luego de 35 segundos aproximadamente y la temperatura final fue 38°C. En la Figura 6 se observa el comportamiento del sensor Vernier, en color verde, en la parte superior del gráfico y el sensor con tecnología Arduino, en azul, en la parte inferior. A partir de estos gráficos y de las estadísticas indicadas en ellos se puede afirmar que el *Sistema de Adquisición de datos de Temperatura Arduino* tiene muy buena precisión.

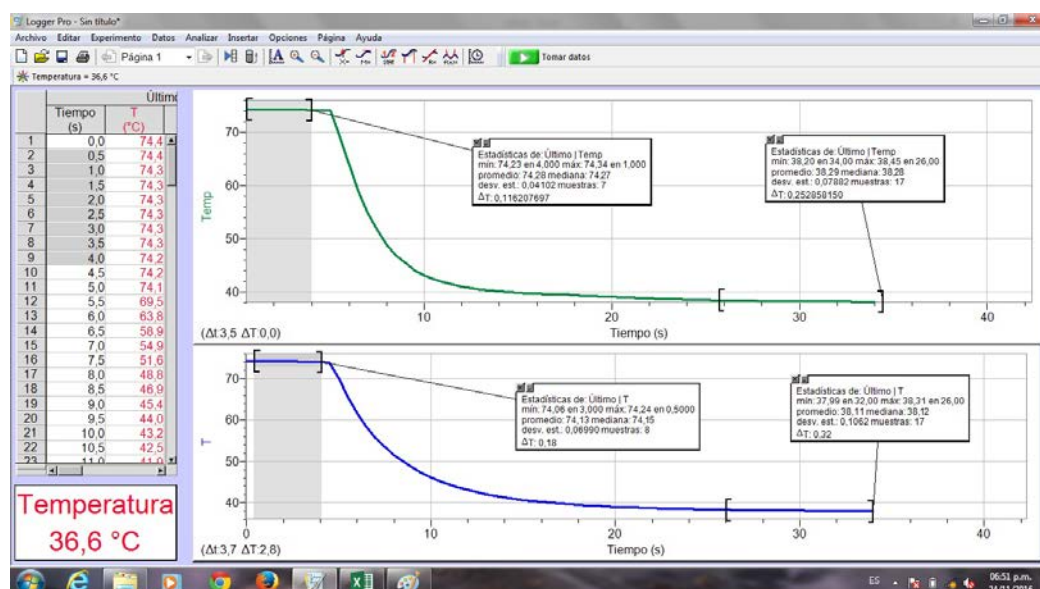


Figura 6

En la parte superior del gráfico con color verde se muestran los datos de temperatura tomados con un sensor Vernier. En la inferior, con color azul, los datos con el sistema Arduino.



## ESTABILIDAD TÉRMICA DE HIDROXIAPATITAS DE CALCIO DOPADAS CON ZINC

José R. Guerra-López<sup>a</sup>, Jorge A Güida<sup>a,b</sup>, Marcelo A. Ramos<sup>a</sup>, Florencia Charpentier<sup>a</sup>, Ana E. Bianchi<sup>c,d</sup> y Graciela Punte<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Básicas, Universidad Nacional de Luján, ruta 5 y 7, CC 6700, Luján, Argentina IFLP (CCT-La Plata.)

<sup>b</sup> CEQUINOR (CCT-La Plata), Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, CC 962, 1900, La Plata, Argentina

<sup>c</sup> Facultad de Ingeniería, UNLP. La Plata. 1 y 47, (1900) La Plata, Argentina.

[bianchi@fisica.unlp.edu.ar](mailto:bianchi@fisica.unlp.edu.ar)

<sup>d</sup> IFLP, CCT-La Plata (CONICET) y Departamento de Física (FCE, UNLP). CC67- 1900 La Plata. Argentina

### INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de intentar mejorar las propiedades osteointegradoras de las hidroxiapatitas de calcio se han sintetizado y caracterizado diversas apatitas con distintos grados de sustitución de Ca(II) por otros iones metálicos como Cd(II), Zn(II), Sr(II), Pb(II) y Mg(II) [1]. La sustitución de Ca(II) por Zn(II) resulta particularmente interesante dado que ambos cationes resultan ser esenciales y muy abundantes en los sistemas biológicos [2]. Para la obtención del biomaterial en forma de granulados o en bloques, se utiliza un proceso de sinterización de la hidroxiapatita de calcio a partir del tratamiento térmico de la misma [3]. En trabajos previos, se estudiaron, a partir de datos de difracción de rayos X de polvos (DRX) empleando el análisis de Rietveld, las estructuras de apatitas puras y sustituidas con Zn(II), sintetizadas por el método de Hayek y Newesely [4]. Los sólidos analizados mostraron una transformación de fase de monoclinica a hexagonal al agregar una pequeña proporción de Zn(II) al proceso de síntesis, cambio atribuible a la incorporación, simultánea con el Zn(II), de un elevado porcentaje de agua a la estructura, lo cual trajo como resultado una baja estabilidad térmica. Con el objetivo de sintetizar hidroxiapatitas de calcio (CaHap) dopadas con Zn(II) que tuvieran una mayor estabilidad térmica en este trabajo se utilizó un método similar al desarrollado por Gibson y Bonfield [5] para preparar hidroxiapatita de Ca pura (CaHap) e hidroxiapatitas con 3, 5, y 10% en masa de Zn. El material obtenido fue sometido a tratamientos térmicos a 600, 800 y 1000 °C y caracterizado por espectroscopía de infrarrojo (FTIR) y DRX.

### PARTE EXPERIMENTAL

#### Síntesis de la hidroxiapatita

La síntesis de CaHap se realizó siguiendo el método descrito por Gibson y Bonfield [5], basado en la reacción de neutralización entre  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y  $\text{H}_3\text{PO}_4$ . En una suspensión formada por la solución de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se adiciona el  $\text{H}_3\text{PO}_4$  a una velocidad de 0,30 ml/seg y a una temperatura ( $T$ ) de 98 °C. Para ajustar el pH a 9 se utilizó una disolución de  $\text{NH}_3$  al 25%. Al concluir la adición de ácido, la suspensión resultante se deja envejecer durante 18 horas en el balón con agitación y temperatura. El sólido sedimentado se filtra y se seca en estufa a 105(5) °C durante la noche.

#### Síntesis de la hidroxiapatita dopada con Zn

Se siguió un procedimiento similar al descrito en parágrafo anterior. Para obtener una CaHap dopada con zinc, (Ca,Zn)Hap, la composición de la solución se fue cambiando en cada síntesis, regulando las cantidades relativas de calcio y zinc. La adición de la solución de  $\text{ZnCl}_2$  se realiza gota a gota simultáneamente con el agregado del ácido fosfórico, 0,30 mol/L. Se sintetizaron muestras con 3, 5 y 10% en masa de Zn(II). Al concluir la síntesis, en

este caso el pH se ajusta con una solución de NaOH. Las muestras se nombraron teniendo en cuenta la relación  $(Zn/(Ca+Zn)) \times 100$ : CaHap, (Ca, Zn)Hap: Zn3, Zn5, Zn10. Todas las muestras preparadas fueron sometidas a tratamientos térmicos de una hora de duración a temperaturas de 600, 800 y 1000 °C.

### 2.3 Técnicas de caracterización

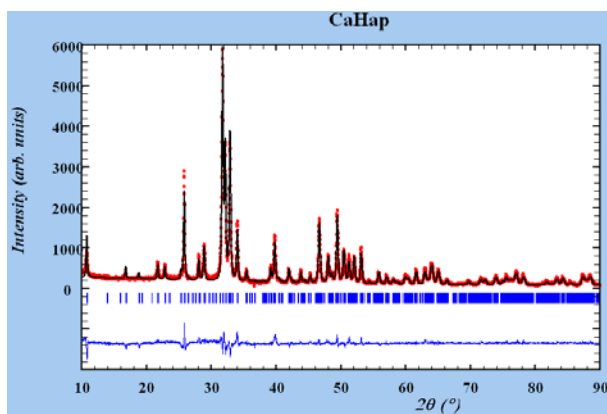
La composición de los productos se controló por determinación del contenido de calcio, zinc, y fósforo en las muestras sintetizadas. El calcio y el zinc se determinaron por espectroscopía de absorción atómica y el fósforo espectrofotométricamente. Los sólidos obtenidos se caracterizaron mediante difracción de rayos-X (DRX) y espectroscopía infrarroja (FTIR).

Los patrones de DRX se obtuvieron con un difractómetro automático X'Pert Pro de PANalytical con detector de centelleo y un monocromador de salida de grafito empleando radiación  $CuK\alpha$  ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ), barriéndose el rango:  $10 \leq 2\theta \leq 120^\circ$ , con un paso de  $0,02^\circ$  y un tiempo de conteo de 5s. Los patrones de difracción fueron analizados mediante el método de Rietveld utilizando el programa Fullprof [6]

Para obtener los espectros de infrarrojo, las muestras se prepararon moliendo en un mortero de ágata, hasta obtener un polvo muy fino, aproximadamente 1mg de compuesto con 30 mg de KBr (calidad espectroscópica). Se compactaron con una prensa hidráulica para formar una pastilla a la presión de 4 Tn. Los espectros se obtuvieron en un espectrofotómetro de transformada de Fourier Shimadzu IRPrestige-21 en el rango  $4000\text{--}400\text{cm}^{-1}$  con resolución de  $4 \text{ cm}^{-1}$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis del patrón de difracción y de la hidroxiapatita preparada por el método propuesto permitió determinar que la misma cristalizó en el sistema monoclinico, grupo espacial  $P2_1/b$  estudiado por primera vez por Elliot y Young [7], presentando un alto grado de cristalinidad. La Figura 1 muestra el análisis de Rietveld del patrón de DRX de la CaHap sintetizada.



**Figura 1.** Análisis de Rietveld de la muestra CaHap.

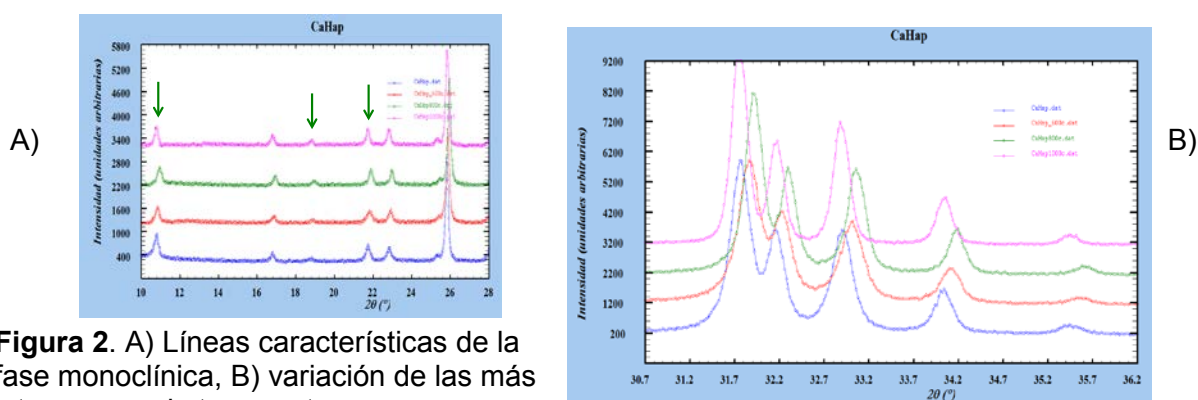
En la Tabla 1 se presentan las constantes de celda obtenidas de dicho análisis y los correspondientes a los análisis de los patrones de las muestras de CaHap tratadas térmicamente a

muestra	$T$ (° C)	$a$ (Å)	$b$ (Å)	$c$ (Å)	$\gamma$ (°)	$V$ (Å <sup>3</sup> )	$\langle D \rangle$ nm
CaHap	sintetizada	9.410	18.856	6.890	119.90	1059.8	509(1)
	600	9.405	18.780	6.884	119.96	1053.4	290(1)
	800	9.399	18.778	6.884	119.88	1053.5	394(2)
	1000	9.419	18.868	6.888	120.00	1060.0	695(3)

**Tabla 1.** Constantes de celda y diámetro promedio aparente,  $\langle D \rangle$ , de la hidroxiapatita sintetizada y sometida a sinterizados, incertidumbres en la última cifra.

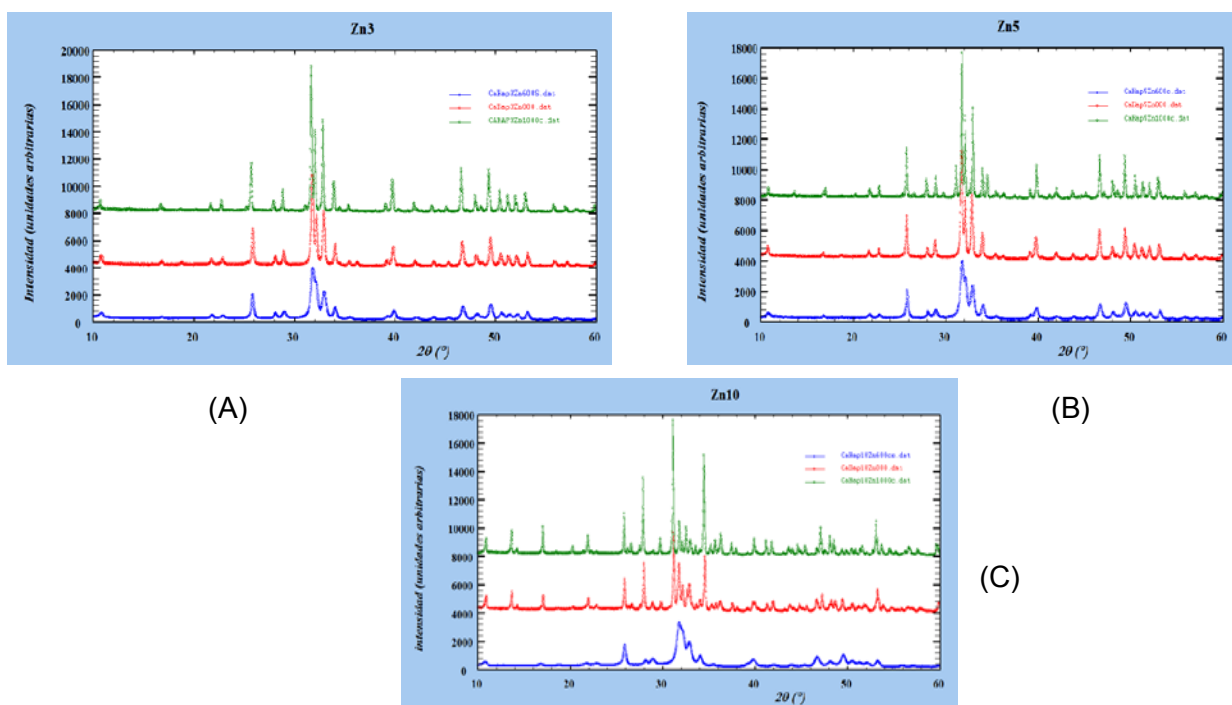
600, 800 y 1000 °C, tampoco en estos patrones existe indicio de la presencia de una segunda fase, ni modificación del grupo espacial por acción térmica hasta la mayor temperatura alcanzada. Los valores obtenidos permiten observar variaciones de las constantes de celda consistentes con las observadas en otros estudios de sinterizado existentes en la bibliografía [5]. La variación del tamaño aparente promedio de los cristalitas podría explicarse por un desorden introducido en el empaquetamiento por la pérdida de aguas reemplazando hidroxilos en los canales y posterior recomposición de la estructura con los procesos de sinterizado a distintas temperaturas.

La Figura 2 muestra las variaciones de las posiciones de las líneas de difracción características de la fase monoclinica, A), y las modificaciones con el tratamiento térmico de las líneas de mayor intensidad, B). Las últimas están relacionadas con variaciones de los parámetros de celda  $a$  y  $b$  como puede verse en la Tabla 1. Esta variación sin alteración del parámetro  $c$  es consistente con la salida de aguas de los canales de la estructura y posterior reordenamiento.



**Figura 2.** A) Líneas características de la fase monoclinica, B) variación de las más intensas con la temperatura.

El análisis de Rietveld de los patrones de difracción de las muestras Zn3, Zn5 y Zn10 evidencia que la incorporación de Zn(II) en el proceso de síntesis no da lugar a la formación de la fase hexagonal de la hidroxiapatita como se determinara en estudios anteriores [8]. Puede



**Figura 3.** Patrones de difracción de las muestras A) Z3, B) Z5 y C) Z10. Los colores indican las temperaturas de sinterizado: azul T= 600, rojo T= 800 verde T= 1000 °C, apreciarse en los tres casos la presencia de una segunda fase en las calcinadas a 1000 °C, Figura 3. Esta fase fue identificada como fosfato  $\beta$ -(Ca,Zn)<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>,  $\beta$ -T(Ca,Zn)P. La Tabla 2 permite observar que el porcentaje de esta fase determinado en las distintas muestras dopadas con zinc es función de la temperatura y cantidad porcentual de zinc empleado en el proceso de síntesis.

Muestra	T (°C)	(Ca,Zn)Hap (%)	$\beta$ -T(Ca,Zn)P (%)
Zn3	1000	82,04	17,96
Zn5	1000	81,35	18,65
Zn10	800	39,95	60,05
Zn10	1000	15,53	84,47

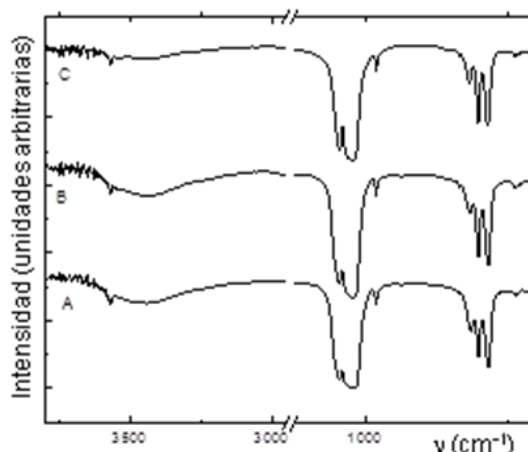
**Tabla 2.** Valor porcentual de cada fase para las muestras con dos fases.

La Tabla 3 muestra las variaciones de las constantes de celda de la fase (Ca,Zn)Hap correspondiente a las muestras obtenidas para Zn3, Zn5 y Zn10 tratadas a las distintas temperaturas. La muestra Zn10 sinterizada a 600 °C evidencia menor cristalinidad como puede apreciarse en la Figura 3 C.

muestra	T (°C)	a (Å)	b (Å)	c (Å)	$\gamma$ (°)	V (Å <sup>3</sup> )
Zn3	600	9,382	18,788	6,883	119,79	1052,7
	800	9,407	18,836	6,882	119,89	1057,1
	1000	9,415	18,832	6,898	120,02	1059,0
Zn5	600	9,389	18,814	6,879	119,86	1054,0
	800	9,403	18,826	6,883	119,85	1056,8
	1000	9,409	18,821	6,904	120,00	1058,7
Zn10	600	9,387	18,887	6,871	119,93	1055,7
	800	9,413	18,862	6,887	120,02	1058,8
	1000	9,407	18,833	6,906	120,02	1059,4

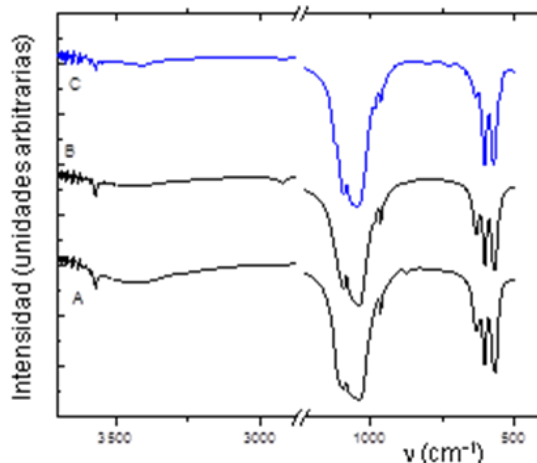
**Tabla 3.** Constante de celda de las muestras con distintos contenidos de Zn (II) sinterizadas a distintas temperaturas.

La Figura 4 presenta los espectros infrarrojos de las muestras CaHap sometidas a tratamientos térmicos a 600, 800 y 1000 °C. Estos espectros exhiben las bandas características de los grupos PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> y OH<sup>-</sup>, presentes en el cristal. En el caso del fosfato, las más intensas son las asociadas al modo de estiramiento antisimétrico del fosfato ( $\nu_3$ ) que aparecen en la región de 1100-1000 cm<sup>-1</sup> y los movimientos de deformación ( $\nu_4$ ) que aparecen en 600-560



**Figura 4.** Espectros infrarrojos correspondientes a las muestras de CaHap sinterizadas: A) 600 °C, B) 800 °C y C) 1000 °C para la muestra Zn3.

$\text{cm}^{-1}$ ; mientras que el  $\text{OH}^-$  se caracteriza por las vibraciones de estiramiento del grupo  $\text{OH}^-$  que aparecen en  $3572 \text{ cm}^{-1}$  y de libración que se observa, aproximadamente, en  $630 \text{ cm}^{-1}$ . También puede observarse en esta figura que al incrementarse la temperatura, se produce una leve disminución de la intensidad relativa de la banda de agua ( $\nu(\text{H}_2\text{O})$ ) a aproximadamente  $3500 \text{ cm}^{-1}$  hecho que sugiere la pérdida de contenido de esta molécula en la estructura. En consecuencia, en el espectro se advierte un aumento de la intensidad relativa de las bandas correspondientes a los grupos  $\text{OH}^-$ . Por otro lado, los modos de vibración del fosfato aparecen mejor resueltos, tanto en la región de mayores frecuencias:  $1090\text{-}1030$  y  $962 \text{ cm}^{-1}$  (estiramiento simétrico y antisimétrico) como en las de menores frecuencias:  $604$ ,  $564$  y  $477 \text{ cm}^{-1}$  (deformaciones simétrica y antisimétrica). Cabe señalar también que estos espectros sugieren que no existe cambio que sugiera una transformación de fase a un polimorfo de mayor simetría o una fase diferente a la estructura apatítica original.



**Figura 5.** Espectros infrarrojos de las muestras de Zn5 sinterizadas: A) 600 °C, B) 800 °C y C) 1000 °C

En la Figura 5 se presentan los espectros infrarrojos de la muestra Zn5 sometida a los distintos sinterizados. En esta muestra se puede observar (más claramente que en la Zn3) la aparición de la segunda fase al comparar los resultados de las muestras sinterizadas a las distintas temperaturas (600, 800 y 1000 °C). Los espectros de las muestras calentadas hasta 800 °C, exhiben un comportamiento similar al descrito para las CaHap, una leve disminución de la intensidad relativa de la banda de agua ( $\nu(\text{H}_2\text{O})$ ) a aproximadamente  $3500 \text{ cm}^{-1}$ , hecho que sugiere la pérdida de contenido de esta molécula en la estructura y en consecuencia, un aumento de la intensidad relativa de las bandas correspondientes a los grupos  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{OH}^-$ . En el espectro de la muestra calentada a 1000 °C, se advierte la presencia de dos nuevas bandas en  $981$  y  $1123 \text{ cm}^{-1}$ , que corresponden a una fase  $\beta$ - $(\text{Ca,Zn})_3(\text{PO}_4)_2$ . Por otra parte la ausencia de bandas en  $1055$ ,  $1039$  y  $950 \text{ cm}^{-1}$  correspondientes a los modos de estiramiento del  $\text{PO}_4^{3-}$  evidencian que la fase tricálcica no es el componente mayoritario de la mezcla [8], en acuerdo con los resultados de DRX-El análisis de todos los resultados indica que el método de síntesis seleccionado, basado en el de Gibson y Bonfield [5], ha resultado efectivo para la obtención de una hidroxiapatita pura monoclinica y más estable que las obtenidas en estudios anteriores realizados sobre apatitas sintetizadas por métodos de precipitación, las que comienzan el proceso de descomposición a 800 °C [8]. A diferencia de los resultados obtenidos con el empleo del método de Hayek y Newesely [4], con el que se sintetizó  $(\text{Ca,Zn})\text{Hap}$  en la fase hexagonal aún para muy bajos porcentajes de Zn [8], las presentes muestras dopadas con zinc

cristalizan en el grupo espacial monoclinico. Para profundizar en los resultados obtenidos se está investigando el sitio/sitios en los que el Zn(II) reemplaza al Ca(II).

## CONCLUSIONES

Los resultados DRX y FTIR de todas las muestras sintetizadas permitió determinar que a partir del empleo del método de síntesis seleccionado se logró producir hidroxiapatitas de Ca(II) puras y dopadas con Zn(II) con mayor estabilidad térmica que las obtenidas previamente por el método de precipitación.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Šupová M., Substituted hydroxyapatites for biomedical applications: A review. *Ceramics International*. 2015; 41: 9203–9231.
2. Dorozhkin S V., Bioceramics of calcium orthophosphates *Biomaterials*. 2010; 31: 1465–1485.
3. Swetha M., Sahithi K., Moorthi A., Synthesis, Characterization, and Antimicrobial Activity of Nano-Hydroxyapatite-Zinc for Bone Tissue Engineering Applications *J Nanosci Nanotechnol*. 2012; 12: 167-172.
4. Hayek E., Newesely H., *Inorg. Syn.* 1963; 7: 63-66.
5. Gibson I.R., Bonfield. W., Preparation and characterization of magnesium/carbonate co-substituted hydroxyapatites. *J. of Materials Science: Materials in medicine*. 2002; 13: 685-693.
6. Rodríguez-Carvajal J., Recent advances in magnetic structure determination by neutron powder diffraction. *Physica B*. 1993; 192: 55-69.
7. Elliot J. C., Young R. A., *Nature*. 1967; 214: 904-906.
8. Guerra-López J.R., Echeverría G.A., Güida J.A. et al., Synthetic hydroxiapatites doped with Zn(II) studied by X-ray diffraction, infrared, Raman and thermal analysis *J Phys Chem Solids*. 2015; 81: 57-65.



## CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DE MEZCLAS DE POLIHIDROXIBUTIRATO CON POLICAPROLACTONA REFORZADAS CON ORGANOMONTMORILLONITAS CON DISTINTO ESPACIADO INTERLAMINAR

Luis D. Junciel<sup>a,b</sup>, Ana E. Bianchi<sup>a,b\*</sup>, Juan P. Correa-Aguirre<sup>c,d</sup>, Adrian Botana<sup>c,d</sup>, Patricia Eisenber<sup>c,d</sup>, Gustavo A. Echeverría<sup>a,b</sup>, Rosa M. Torres-Sanchez<sup>e</sup> y Graciela Punte<sup>a</sup>

<sup>a</sup>IFLP (CCT-La Plata.) Dep. Física. Fac. Ciencias Exactas, UNLP. 115 y 49, (1900) La Plata. Argentina. [junciel@fisica.unlp.edu.ar](mailto:junciel@fisica.unlp.edu.ar), CC 67, UNLP, La Plata

<sup>b</sup>Fac. de Ingeniería, UNLP. La Plata. 1 y 47, (1900) La Plata, Argentina

<sup>c</sup>INTI Plásticos, Av. Gral. Paz 5445 (1650), San Martín, BA, Argentina;

<sup>d</sup>3iA, UNSAM, Belgrano 3563 (1650), San Martín, Argentina

<sup>e</sup>CETMIC (CCT-La Plata). Camino Centenario y 506, (1897), M.B. Gonnet, BA, Argentina

### INTRODUCCIÓN

Continuando con investigaciones anteriores [1], en este trabajo se realiza el análisis de las variaciones inducidas por la modificación en la cantidades relativas de los polímeros biodegradables: policaprolactona (PCL) y polihidroxibutirato (PHB) en las características mecánicas, térmicas y dieléctricas de películas producidas a partir de mezclas de ambos polímeros reforzadas con organoarcillas (OMMT) que presentan distinto espaciado interlaminar. En trabajos previos hemos determinado que: la inclusión de las OMMT comerciales Cloisite 30B® (CB30), Cloisite15A® (C15A) y Cloisite93A® (C93A) en películas de mezclas 50/50 de estos polímeros modifica la morfología de la mezcla, mejora la resistencia a la tracción, aumenta la elasticidad y disminuye la permeabilidad del oxígeno [1-2]. En este trabajo hemos encarado la caracterización de películas obtenidas a partir de mezclas de los mismos polímeros pero en distinta proporción PHB 20% y PCL 80%, en adelante 20/80, pura y reforzadas mediante la inclusión de las OMMT mencionadas. Las muestras producidas fueron analizadas mediante dispersión de rayos X de alto (WAXS) y bajo (SAXS) ángulo y microscopía electrónica de barrido (SEM). Se estudiaron además sus propiedades mecánicas y dieléctricas. Se presentan los resultados y se comparan con los obtenidos previamente para las muestras 50/50 [1].

### PARTE EXPERIMENTAL

#### Materiales

Para la obtención de las matrices poliméricas de mezclas PHB/PCL se utilizó PHB Biocycle 1000 producido por Biocycle Brasil y PCL CAPA FB100 producido por Perstorp UK Limited. Las OMMT empleadas fueron: Cloisite® modificadas con sales de amonio cuaternarias

OMMT	Cloisite 15A® (15A)	Cloisite 93A® (93A)	Cloisite 30B® (30B)
Organoarcillas (OMMT)	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{CH}_3 - \text{N}^+ - \text{HT} \\   \\ \text{HT} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{H} - \text{N}^+ - \text{HT} \\   \\ \text{HT} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH} \\   \\ \text{CH}_3 - \text{N}^+ - \text{T} \\   \\ \text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH} \end{array}$

**Tabla 1.** Características de las OMMT utilizadas. T y HT indican ramificaciones carbonadas consistentes en  $\approx 65\%$  C18;  $\approx 30\%$  C16;  $\approx 5\%$  C14.

(C15A, C30B) y una terciaria (C93A) producidas por Southern Clay Products Inc, EEUU. La estructura química de las OMMT se describe en la Tabla 1.

## Preparación de los nanocompuestos

Las mezclas PHB/PCL se realizaron en proporciones PHB 20% y PCL 80 % p/p y 5% de las diferentes arcillas en mezclador discontinuo BRABENDER (165 °C/ 7 minutos/ 50 rpm). Las muestras se identificaron como % PHB /% PCL /arcilla. A partir de estas mezclas se obtuvieron películas por termocompresión (170 °C, 100 bar de presión).

## Técnicas de caracterización

Los datos de dispersión de rayos X (SAXS y WAXS) fueron obtenidos en la línea SAXS2 en Laboratorio Nacional de Luz Sincrotrón (LNLS), Campinas, Brasil, utilizando una longitud de onda 0,155 nm y una distancia detector-muestra de 600,6797 mm. El rango de  $q$  detectado fue  $0,25 \leq q \leq 5,6 \text{ nm}^{-1}$ . Todas las medidas fueron realizadas a temperatura ambiente y registradas en un detector 2D-CCD (MAR-USA 165 mm). Las curvas unidimensionales fueron obtenidas luego de la integración de datos 2D usando el programa FIT2D [3]. Los datos fueron corregidos sustrayendo una contribución parasita de la dispersión total.

Las imágenes SEM se obtuvieron con un microscopio electrónico Quanta FEG 250. Las observaciones se realizaron a 15 KV en condiciones de bajo vacío en superficies fracturadas en nitrógeno líquido. Las micrografías se realizaron a aumentos de 6000 X.

Las propiedades mecánicas a tracción de las mezclas PHB/PCL se determinaron a 23 °C y 50% HR utilizando una máquina de ensayo universal INSTRON 5569 de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM D882-12 con probetas planas de sección rectangular de 10 mm de ancho, las cuales fueron acondicionadas a 23 °C y humedad relativa de 50 % durante 7 días.

Las propiedades dieléctricas se determinaron a temperatura ambiente en función de la frecuencia a partir de resultados de espectroscopía de impedancia (IE) obtenidos en el rango de frecuencia 1 MHz – 1mHz mediante el empleo de un Solartron 1260. Las condiciones de medida fueron: AC: 100 mV y DC: 0 V; 20 pts. / dec. y tiempos de integración por punto que aseguren un error en la medida menor o igual a 1%.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de todas las curvas log-log SAXS y WAXS de los polímeros con y sin arcillas estudiados (PHB/ PCL/OMMT), revela que los mismos [1] y sus mezclas (20/80), no poseen picos definidos en la región de WAXS (Figura 1). En la región de SAXS las mezclas puras son sumas de las curvas de los polímeros de partida, denotando que son inmiscibles.

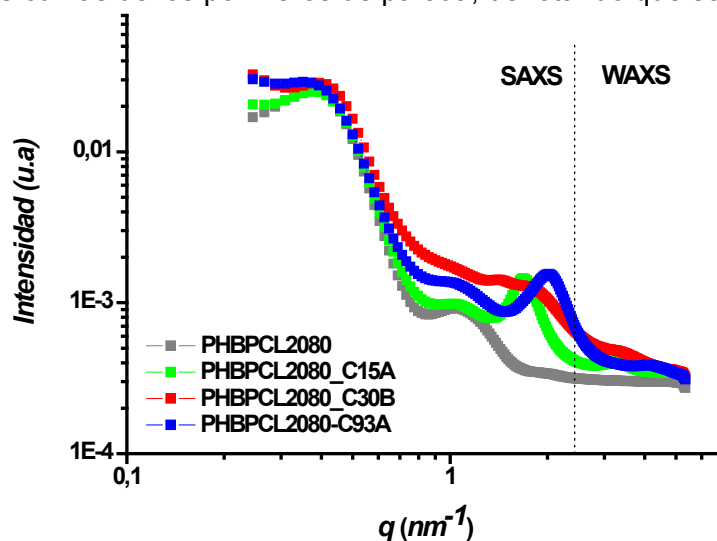


Figura 1. Dispersión de rayos X de bajo y alto ángulo para todas las muestras estudiadas.

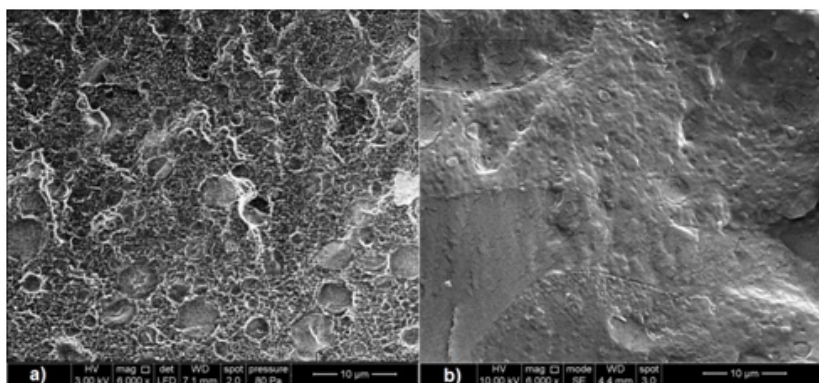
El gráfico de todas las curvas log-log SAXS y WAXS de las películas estudiadas en el presente trabajo y su comparación con los resultados obtenidos en [1] revela que todas las OMMT incorporadas a los polímeros individuales y en las mezclas 20/80 muestran expansión del espaciado basal. Estos resultados se listan en la Tabla 2 junto con los reportados previamente para las arcillas C15A, C30B y C93A [1]. Esto permite concluir que en todas las muestras estudiadas parte de la mezcla de polímeros se ha difundido en las galerías de la OMMT, disminuyendo el grado de coherencia en el apilamiento. Esta disminución es más notoria en la muestra con inclusión de 30B, que no presenta líneas bien definidas para ningún valor de  $q$ . Comportamientos similares fueron observados en las mezclas 50/50, ver Tabla 2.

Muestra	$q$ (nm <sup>-1</sup> )	$d_{(001)}$ (nm)	$\Delta d$ (nm)*
Cloisite15A	2,00	3,14	0
PCL15A	1,76	3,56	0,42
PHB15A	1,64	3,86	0,72
PHBPCL5050_15A	1,68	3,73	0,60
PHBPCL2080_15A	1,69	3,71	0,57
Cloisite93A	2,55	2,46	0
PCL93A	2,17	2,89	0,43
PHB93A	1,74	3,61	1,15
PHBPCL5050_93B	1,66	3,78	2,32
PHBPCL2080_93B	2,02	3,11	0,65
Cloisite 30B	3,44	1,82	0
PCL30B	1,72	3,65	1,83
PHB30B	1,52	4,13	2,31
PHBPCL5050_30B	1,63	3,85	2,03
PHBPCL2080_30B	1,42	4,42	2,6

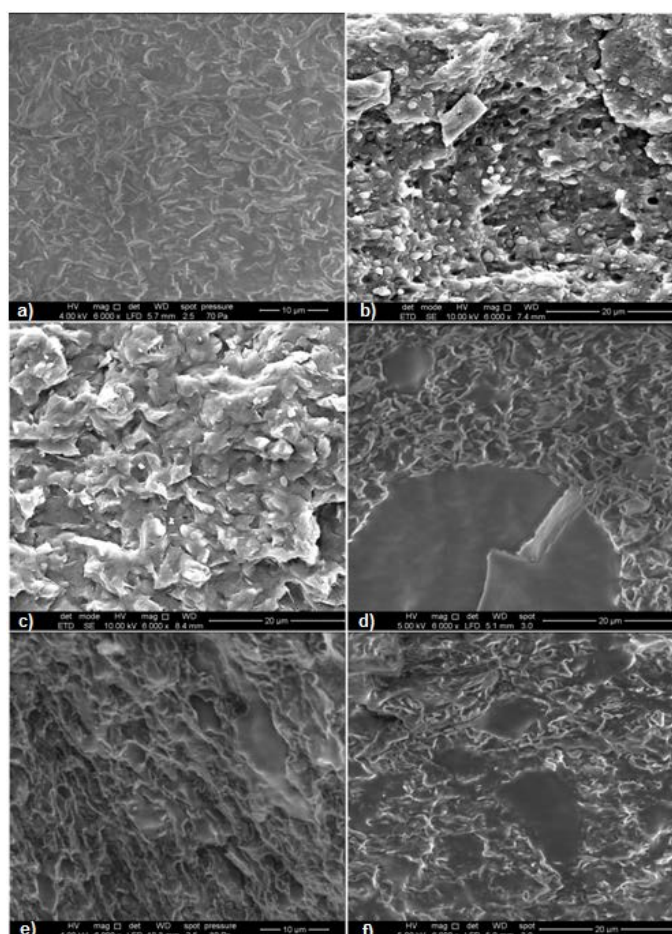
**Tabla 2.** Posición de los picos SAXS/WAXS y distancia  $d_{(001)}$  de las mezclas PHB/PCL/OMMT.

\* $\Delta d$  corresponde al incremento respecto al espaciado de cada una de las Cloisite.

La evolución de la morfología al modificar la proporción de los polímeros constituyentes de las mezclas PHB/PCL se analizó a partir de las imágenes SEM (Figura 2). En estas micrografías se observa que la mezclas PHB/PCL son inmiscibles en todo el rango de composiciones estudiado. Para la mezcla 20/80 (Figura 2a), se observa una separación marcada de las fases en la cual el componente minoritario PHB se encuentra disperso en la matriz PCL en forma de dominios esféricos de tamaño promedio 5  $\mu\text{m}$ . A medida que la proporción de PHB aumenta se observa que los dominios esféricos de la fase dispersa van aumentando de tamaño hasta formar una estructura de tipo continua. En el caso de la mezcla 50/50 (Figura 1b), se observan dominios de PHB en fase continua PCL y dominios alargados de PCL en fase continua PHB.



**Figura 2.** Micrografías SEM de las mezclas puras (a) PHB 20/PCL 80, (b) PHB 50/PCL 50. Las micrografías SEM correspondientes a la Figura 3 muestran que la inclusión de arcillas genera cambios morfológicos a las matrices estudiadas. En todas las mezclas 20/80/OMMT se observa la presencia de tactoides de arcilla uniformemente distribuidos en la matriz lo cual concuerda con lo observado por SAXS. Además se observa que el tamaño de los dominios de la fase dispersa disminuye de 5 µm (mezcla 20/80) a valores entre 1,05 y 1,6 µm para las mezclas 20/80/OMMT. Este resultado concuerda con lo reportado por Brito *et al.* [4] quienes observaron que el agregado de arcillas Cloisite a mezclas inmiscibles PLA/EMA produce disminución de la coalescencia de las fases en las mezclas disminuyendo el tamaño de los dominios de la fase dispersa.



**Figura 3.** Micrografías SEM de las mezclas PHB/PCL con diferentes OMMT: a) 20/80/Clo 15A, b) 20/80/Clo 93A, c) 20/80/Clo 30B, d) 50/50/Clo 15A, e) 50/50/Clo 93A, f) 50/50/Clo 30B.

En la Tabla 3 se presentan los valores del módulo elástico (E), esfuerzo máximo ( $\sigma_{\max}$ ) y porcentaje de deformación a rotura (%) de las mezclas PHB/PCL. PHB y PCL puros son dos materiales con características diferentes, el PHB es frágil y de alta rigidez (módulo de elasticidad elevado). La PCL por su parte posee un menor módulo de elasticidad pero mayor resistencia. En el caso de las mezclas estudiadas se observa que el módulo de elasticidad disminuye conforme aumenta la proporción de PCL mientras que el porcentaje de deformación y el esfuerzo máximo aumentan con la proporción de PCL.

La adición de las arcillas genera un efecto rigidizante en las mezclas produciendo, en general, un aumento en el módulo elástico el cual es más significativo en las mezclas que contienen OMMT C30B, C93A. Sin embargo, salvo las mezclas con OMMT C93A, el porcentaje de deformación y el esfuerzo máximo de las mezclas disminuyeron como resultado del agregado de arcillas. Según Ray *et al.* [5] una baja dispersión de arcillas en una matriz polimérica genera propagadores de falla bajo un esfuerzo aplicado por lo cual disminuye la deformación y el esfuerzo máximo. En el caso de la mezcla con OMMT C93A el esfuerzo máximo no se modificó. Este resultado es consistente con el aumento de 112% reportado en la mezcla 50/50, concordando con los resultados obtenidos por Chen *et al.* [6] los cuales mostraron que el agregado de OMMT produce aumento del esfuerzo máximo en matrices poliméricas debido a la formación de enlaces químicos en la región interfacial entre polímero y arcilla.

Muestra	Modulo Tensil (MPa)	Esfuerzo máximo (MPa)	Elongación a la rotura (%)
PHB	1118 (127)	2,18 (0,47)	0,65 (0,18)
PCL	326 (42)	16,19 (1,29)	238,75 (64,41)
20/80	369 (28)	13,28 (0,66)	26,36 (9,99)
20/80/Clo 15A	517 (58)	10,20 (0,78)	2,87 (0,44)
20/80/Clo 93A	468 (22)	13,20 (0,5)	18,76 (3,45)
20/80/Clo 30B	594 (36)	11,31 (0,78)	4,50 (0,41)
50/50	817(54)	6,27 (1,32)	3,03 (0,71)
50/50/Clo 15A	953(74)	4,31 (0,79)	0,70 (0,30)
50/50/Clo 93A	1096 (74)	13,3 (0,5)	1,72 (0,13)
50/50/Clo 30B	1226 (51)	6,88 (0,62)	0,71 (0,09)

**Tabla 3.** Propiedades mecánicas a tracción de las mezclas en estudio

Los gráficos de constante y pérdida dieléctrica  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$  de las sustancias estudiadas se muestran en la Figura 4. La comparación de los mismos con los obtenidos previamente [1] indican que disminuye el rango de la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ),  $4.8 < \epsilon' < 5.6$  en las 20/80 y  $5 < \epsilon' < 9$  en las 50/50, para valores de  $f > 1\text{kHz}$ . A bajas frecuencias ( $f < 100\text{ Hz}$ ) puede observarse mayor dispersión en las constantes dieléctricas con máximos, en  $f = 1\text{ mHz}$ , de  $\sim 118$  en las 20/80 reforzadas con C15A y C30B y de  $\sim 260$  en las mezclas 50/50. En todas las películas la pérdida dieléctrica ( $\epsilon''$ ) está en el rango  $0.02 < \epsilon'' < 0.06$  para  $f = 10^6\text{ Hz}$ , mientras que a bajas frecuencias las reforzadas con C30B presentan la mayor pérdida dieléctrica: 780 (20/80) y 460 (50/50).



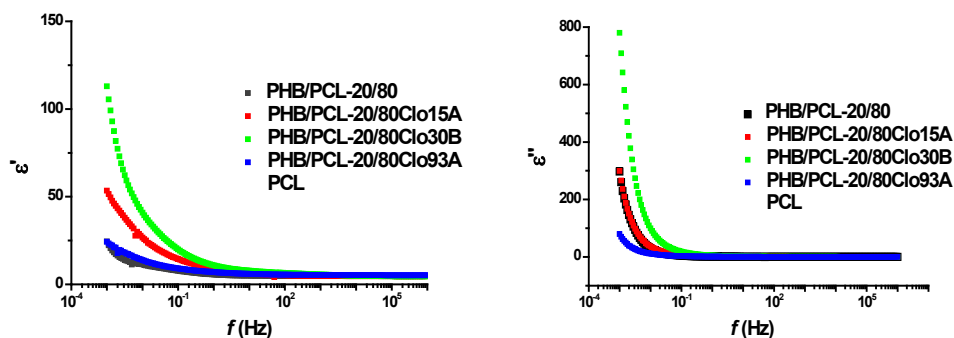


Figura 4. Comparación de curvas de constante y pérdida dieléctrica  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$  PHB/PCL-20/80

## CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrollaron compuestos poliméricos biodegradables a partir de mezclas de los polímeros PHB/PCL con las diferentes organoarcillas analizadas. La comparación de las propiedades de las películas reforzadas a partir de mezclas 20/80 y 50/50 sugiere que las sustancias estudiadas poseen comportamientos estructurales y morfológicos similares. Por otro lado la deformación y el módulo de elasticidad dependen del porcentaje de PCL, obteniéndose así materiales con propiedades mecánicas específicas. La adición de las arcillas a las distintas mezclas genera un efecto rigidizante produciendo un aumento en el módulo elástico. Este efecto es más significativo en las mezclas que contienen OMMT C30B y C93A. Se estableció que las propiedades mecánicas y eléctricas en las mezclas PHB/PCL dependen del modificador orgánico utilizado, lo cual permite diseñar materiales con propiedades específicas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] L.D. Junciel *et al.* III Jornadas ITE. Facultad de Ingeniería. UNLP. (2015) y ref. a partir de esta. <http://www.ing.unlp.edu.ar/investigacion/jornadas2015>
- [2] A. Botana *et al.* Appl. Clay Science **47**, 263-270 (2010).
- [3] A. Hammersley, <http://www.esrf.eu/computing/scientific/FIT2D/>
- [4] G.F. Brito *et al.* Polym. Eng. Sci 54, 1922-1930 (2014).
- [5] S.S Ray *et al.* Polymer. 46, 12430-12439 (2005).
- [6] G.X. Chen *et al.* Polymer 46, 11829 (2005).



## TECNICAS DE SPECKLE DINAMICO: DESARROLLOS Y PERSPECTIVAS

Marcelo. Trivi<sup>1-2</sup>, Héctor J. Rabal<sup>2</sup>, Eduardo E. Grumel<sup>1-2</sup>, Nelly Cap<sup>2</sup>, Leandro Buffarini<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UID Óptimo, Dpto. Cs. Básicas, Fac. Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones Ópticas (CONICET La Plata – CIC – UNLP)

Casilla Correo 3, 1897 Gonnet – La Plata

E-mail: [marcelot@ciop.unlp.edu.ar](mailto:marcelot@ciop.unlp.edu.ar)

### INTRODUCCIÓN

Speckle láser dinámico (DLS) es una técnica óptica que se usa en varias aplicaciones en biología, medicina e industria [1-2].

En nuestro grupo se trabaja desde hace muchos años en esta técnica y recientemente se han desarrollado nuevas aplicaciones y algoritmos de cálculo. En particular, se han presentado nuevos descriptores para análisis de patrones de speckle de baja actividad [3], estudios de patrones espacio-temporales mediante el análisis de componentes principales [4], y segmentación de imágenes utilizando mapas auto-organizados [5]. La técnica de speckle dinámico se ha aplicado a estudios de quimiotaxis de bacterias en hidrocarburos [6], determinación de la dureza en semillas de maíz [7], caracterización de porcelanas de interés en electrotecnia [8], procesos de hidro-adsorción en superficies de arcilla para aplicaciones de catálisis [9] y mediciones de contracción durante la fotopolimerización de resinas utilizadas en odontología [10].

En este trabajo, se discute una breve reseña de los conceptos básicos de la técnica (DLS) y el dispositivo experimental utilizado. Luego se muestran algunos ejemplos de aplicaciones y un dispositivo compacto portátil de bajo costo que ha sido desarrollado para uso fuera de laboratorio. Finalmente, se presentarán las perspectivas de investigaciones futuras en este campo.

### 1. Speckle Dinámico

El speckle dinámico es un fenómeno óptico producido cuando un láser ilumina un objeto que presenta algún tipo de movimiento microscópico. Puede observarse por reflexión en superficies opacas y también por transmisión en objetos transparentes. Se basa en un fenómeno de dispersión que se produce cuando luz láser ilumina objetos activos (tejidos biológicos, procesos industriales, etc). En los casos típicos, la superficie de la muestra parece estar cubierta por pequeños puntos brillantes y oscuros que varían de manera aleatoria de acuerdo con las fluctuaciones de la superficie. Por lo tanto, el estudio de la evolución temporal de los patrones de speckle proporciona una herramienta interesante para caracterizar los parámetros que intervienen en los procesos dinámicos de la muestra.

El esquema experimental utilizado se muestra en la Figura 1. Un láser de He-Ne de baja potencia (10mW,  $\lambda = 632.9$  nm) ilumina el objeto. El detector es una cámara CCD conectada a un "framegrabber" para digitalizar las imágenes de los patrones de speckle que luego son almacenados y procesados con diferentes algoritmos en un computador personal.

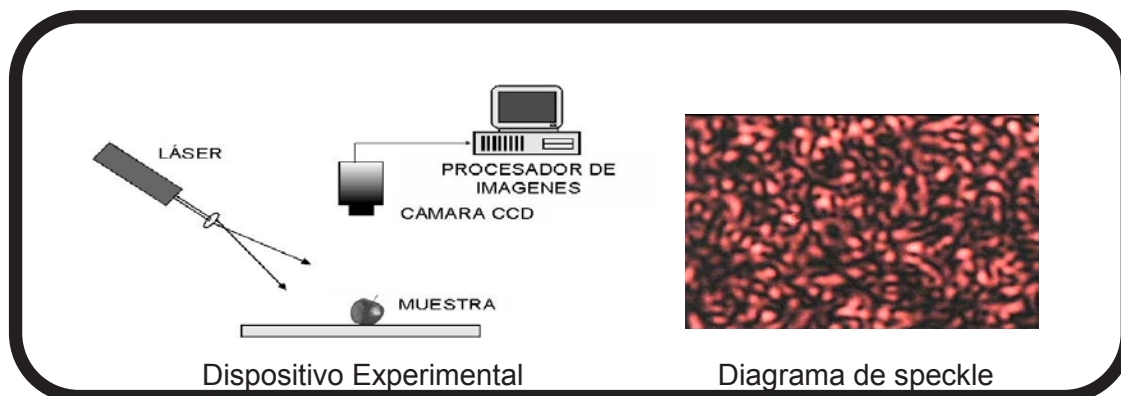


Figura 1. Dispositivo experimental

Para el caso en que la actividad presente un comportamiento homogéneo en todos los puntos de la superficie, el análisis de los datos de los diagramas de speckle dinámicos se basa en la construcción de las imágenes llamadas “historias temporales de los patrones de speckle” (THSP acrónimo en inglés) y en el desarrollo de algoritmos para su análisis [11-12]. En la Figura 2 se muestran THSP correspondientes a tres estados diferentes de una superficie. a) alta actividad, b) actividad media, c) sin actividad (superficie rígida).

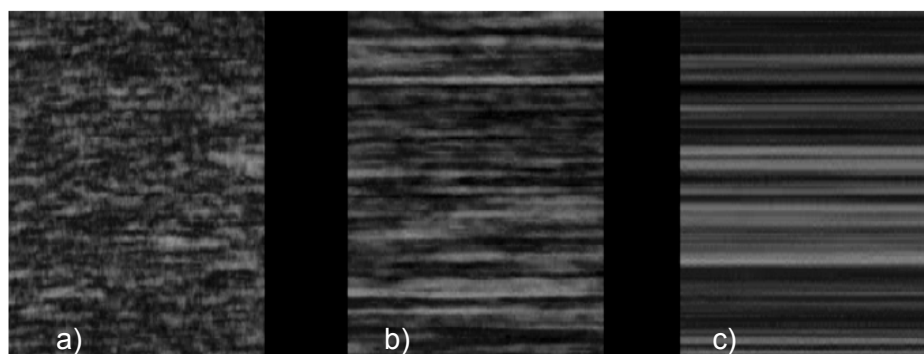


Figura 2. Historias Temporales de patrones de speckle (THSP)

En el caso en que la superficie presente zonas con distinta actividad de speckle, es necesario segmentar las imágenes, estudiando series temporales para caracterizar la evolución de cada pixel individual como se muestra en la Figura 3.

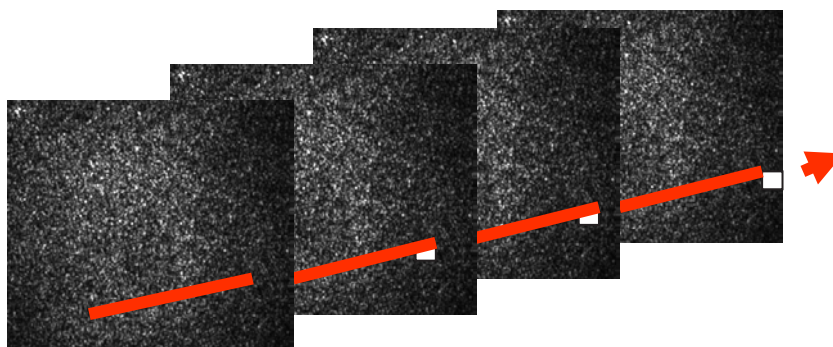


Figura 3. Evolución temporal de un pixel. Segmentación de imágenes en superficies con diferente actividad de speckle.

Luego de adecuados algoritmos de procesamiento de datos, es posible construir imágenes en tonos de gris caracterizando áreas del objeto que indican distinta actividad. Finalmente es posible pseudocolorear estas imágenes para una mejor discriminación de dichas áreas.

## RESULTADOS

Se presentan ejemplos de utilización de la técnica DLS en el estudio de procesos de secado de pinturas, capilares sanguíneos y viabilidad de semillas.

### Proceso de secado de pinturas

En esta sección se presentan resultados de la aplicación de la técnica DLS al estudio del proceso de secado de pinturas.

En este caso, se extendió una muestra de pinturas (“liquid paper”) de espesor controlado y se estudió el proceso desde el estado inicial correspondiente a pintura “fresca” hasta el estado final cuando la pintura puede considerarse “seca”.

En la Figura 4 se observa una alta actividad de speckle inicial y luego un comportamiento monótono decreciente hasta alcanzar un estado estacionario al final del proceso.

Un estudio detallado de esta aplicación se encuentra en la Ref[13].

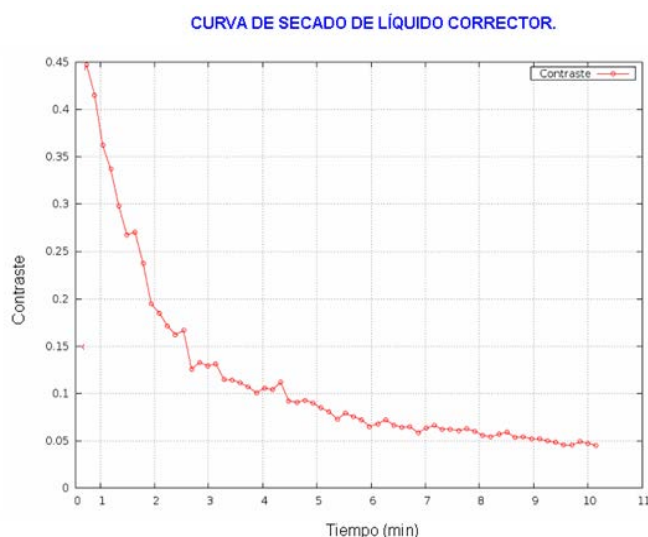


Figura 4. Proceso de secado de pinturas

### Circulación sanguínea

La técnica DLS ha sido empleada para estudios de capilares sanguíneos. Este es un ejemplo donde es necesaria la segmentación de las imágenes para mostrar zonas con distinta actividad de speckle.

En este caso, utilizando el dispositivo experimental descrito en la Secc. 2 se iluminó el extremo de un dedo índice de uno de los autores de este trabajo.

Luego del procesamiento de los datos, la Figura 5 muestra la imagen en pseudocolor de los resultados experimentales provistos por DLS. Se observa claramente la distribución de los capilares bajo la uña del dedo en estudio

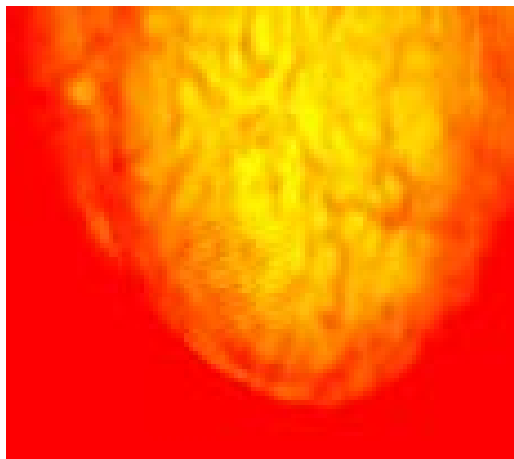


Figura 5. Capilares sanguíneos bajo la uña de un dedo de la mano

### Semillas de maíz

Semillas de maíz han sido estudiadas mediante la técnica DLS.

La Figura 6 muestra la imagen en pseudocolor de los resultados experimentales obtenidos. Se observan las zonas de mayor actividad (en rojo) correspondientes al embrión y las de menor actividad (en verde y azul) correspondientes al endosperma. Esta aplicación es relevante en estudios de viabilidad [14] y de dureza [7] de semillas de maíz.

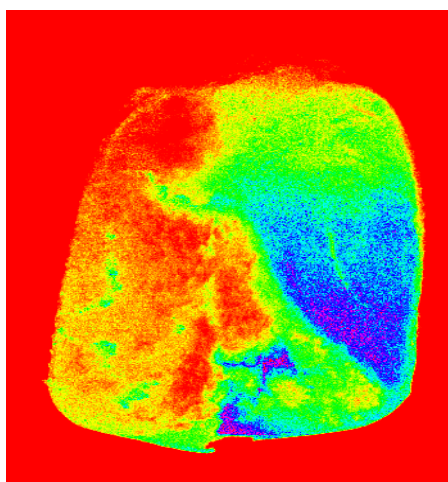


Figura 6. Semilla de maíz. Discriminación de zonas de embrión y endosperma.

### Dispositivo Experimental Compacto de Bajo Costo

Recientemente, en nuestro grupo se ha desarrollado un dispositivo experimental DLS transportable para utilización fuera de laboratorio [15], que se muestra en la Figura 7. Se han reemplazado algunas componentes del dispositivo standard descrito en la Secc. 2 para que el mismo sea de de bajo costo.

Luego de un análisis exhaustivo de los diferentes dispositivos asequibles en el mercado, se seleccionaron los siguientes elementos:

- Laser Diode DPSS (10mW,  $\lambda = 671\text{nm}$ )
- Plataforma Raspberry Pi (modelo B+) como subsistema de control y procesamiento. El sistema operativo utilizado es el Rapsbian (basado en Linux)

Debian y optimizado para el hardware de  $R\pi$ ). El programa principal fue desarrollado utilizando Python.

- Cámara web (con conexión USB) de bajo costo como dispositivo para adquisición de imágenes.
- Mini monitor LCD con entrada para señal de video compuesto, como elemento de visualización (también es posible la utilización de un monitor VGA, con cable conversor HDMI a VGA).
- Mini teclado inalámbrico, con touchpad incorporado.



Figura 7. Dispositivo DLS compacto de bajo costo.

## CONCLUSIONES

El estudio de la evolución temporal de patrones de speckle mediante la técnica DLS, ha demostrado ser una herramienta eficaz para la caracterización de procesos dinámicos. Se han podido desarrollar métodos que proveen resultados cuantitativos y cualitativos para la discriminación de regiones con distinta actividad de speckle que han permitido múltiples aplicaciones. La técnica es relativamente fácil de implementar a un costo reducido.

Entre las perspectivas futuras se puede mencionar la aplicación a imágenes de ultrasonido y de microscopía, implementación de algoritmos que emplean dimensión fractal e imágenes de vórtices ópticos, desarrollo de modelos de scattering múltiple y nuevas aplicaciones de interés biomédico, biotecnológico e industrial.

## Agradecimientos

Las investigaciones son financiadas mediante Proyecto I192 Fac. Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata y Proyectos PIP CONICET y CICPBA.

## REFERENCIAS

- [1] Y. Aizu, T. Asakura, *Trends in Optics*, A. Consortini, ed. (Academic Press), Chap. 2. (1996).
- [2] H. Rabal, R. Braga Eds. *Dynamic Laser Speckle and Applications*. CRS Press, Taylor and Francis Publisher. (USA) (2009).
- [3] M. N. Guzmán, G. H. Sendra, H. J. Rabal, M. Trivi. *Applied Optics*, **53**, 14-21, (2014).
- [4] J. López-Alonso, J. Alda, H. Rabal, E. Grumel, M. Trivi, *Journal of Optics*, **17**, 035609, (2015).
- [5] L. Passoni, A. DaiPra, G. Meschino, M. Trivi, H. Rabal, M. Guzmán, A. Scandurra, M. Gonzalez, C. Weber. *Journal of Optics*, **18**, 085606, (2016).

- [6] M. Nisenbaum, M. Guzman, J. F. Gonzalez, G. H. Sendra, A. Bouchet, J. Pastore, M. Trivi, S. E. Murialdo. *International Journal of Environment and Health*, 7, 58-69 (2014).
- [7] C. Weber, A. L. Dai Pra, L. I. Passoni, H. J. Rabal, M. Trivi, G. J. PoggioAguerre, *Food Science and Nutrition* 2, 557-564, (2014).
- [8] F. Salguero, G. Bertolini, C. Cabello, E. Grumel, M. Trivi, G. Barbera. *Progress in ElectromagneticsResearchSymposium*, 1666 - 1669, (2015).
- [9] R. D. Mojica-Sepulveda, L. J. Mendoza-Herrera, M. F. Agosto, E. E. Grumel, D. B. Soria, C. I. Cabello, M. Trivi. *Advances in Chemical Engineering and Science (ACES)*. Enpresa.
- [10] G. Arenas, M. Guzmán, C. Vallo, R. Duchowicz, M. Trivi. *Polymer Testing*, 50, 262-269, (2016).
- [11] A. Oulamara, G. Tribillon, J. Duvernoy, *Journal of Modern Optics*; 36, 165-179, (1989).
- [12] R. Arizaga, M. Trivi, H. J. Rabal. *Optics and Laser Technology*. 31, 163-169, (1999).
- [13] J. Amalvy, C. Lasquibar, R. Arizaga, H. Rabal, M. Trivi. *Progress in Organic Coating*, 42, 89-99, (2001).
- [14] R. A. Braga, I. M. dal Fabbro, F. V. Borem, G. Rabelo, R. Arizaga, H. J. Rabal, M. Trivi. *Biosystems Engineering*, 86, .287-294, (2003).
- [15] E. Hanisch, G. Riera, E. E. Grumel, M. Trivi. "IX Reunión Iberoamericana de Óptica y XII Reunión Iberoamericana de Óptica, Láseres y Aplicaciones (RIAO/OPTILAS), Pucón, Chile. Noviembre 2016.



## TÉCNICAS ÓPTICAS DE COMPRESIÓN DE DATOS HOLOGRAFICOS

Alejandro Velez Zea<sup>1</sup>, Sorayda Trejo<sup>2</sup>, John Fredy Barrera<sup>2</sup>, Myrian Tebaldi<sup>1</sup>, Roberto Torroba<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UIDET OPTIMO, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina y Centro de Investigaciones Ópticas (CONICET La Plata-CIC-UNLP)

<sup>2</sup> Grupo de Óptica y Fotónica, Instituto de Física, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Actualmente, la holografía convencional evolucionó en una técnica opto-digital para el registro de campos ópticos, denominada holografía digital, que aprovecha las ventajas de los sistemas ópticos unidos a la flexibilidad del procesamiento digital [1]. La holografía digital, de la misma manera que la holografía convencional, requiere el conocimiento de la información de la fase y de la amplitud del frente de onda. Esto se logra mediante el registro de la interferencia entre el haz que proviene del objeto y un haz de referencia [2] o múltiples imágenes desplazadas en fase [3].

Como ya mencionamos, un holograma digital contiene información tanto de amplitud como de fase, por lo tanto es evidente que almacenar este tipo de datos implicará un volumen mayor al de una imagen que contiene solo información de amplitud.

Se han desarrollado numerosas técnicas para reducir el volumen de datos holográficos tales como la cuantización [4], el filtrado [5] y algoritmos de compresión con y sin pérdida, es decir reduciendo o no la calidad de los datos [6]. Uno de los algoritmos de compresión de imágenes con pérdidas más utilizados es el del Joint Photography Expert Group (JPEG) [7]. En este algoritmo la reducción del volumen trae aparejada una pérdida de la calidad de la imagen. Por otra parte, una técnica exitosa debería garantizar una máxima reducción del volumen de datos con una mínima pérdida.

En la Ref. [8] se verificó que el algoritmo JPEG no es eficiente cuando se trabaja con imágenes que exhiben ruido aleatorio. Sin embargo, el efecto indeseado del ruido se puede reducir mediante el uso de técnicas de filtrado de la imagen de entrada.

Por otra parte, en la Ref. [9] se encontró que la aplicación del JPEG a hologramas digitales no es la más adecuada dado que la componente de fase del holograma presenta variaciones aleatorias. Asimismo, debemos destacar que ese ruido aleatorio lleva la información necesaria para la reconstrucción del holograma. Es consecuencia, el ruido aleatorio que exhibe la componente de fase no se puede eliminar por procedimientos de filtrado, conspirando en consecuencia contra la eficiencia del método.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una técnica alternativa que sea eficiente para disminuir el volumen de datos holográficos, reduciendo a un mínimo la pérdida de calidad de la información reconstruida. La propuesta está basada en el uso de un sistema óptico virtual para realizar un escalado de los datos del campo óptico obtenido a partir del holograma. Se analizará la capacidad de compresión de nuestra propuesta y se la comparará con el JPEG. Por otra parte, se evaluará la calidad de la información reconstruida. La métrica utilizada para evaluar la calidad de los datos reconstruidos en términos de la reducción del volumen es el coeficiente de correlación (CC) [10].

### Método de escalado óptico y su comparación con el algoritmo de compresión JPEG

Los datos son generados utilizando el arreglo experimental de holografía digital de Fourier fuera de eje de la Figura 1. Sobre la cámara CCD se registró el patrón de interferencia formado entre el haz de referencia y la transformada de Fourier de un objeto

tridimensional difuso. El holograma almacenado en la cámara CCD se muestra en la Figura 2. Posteriormente, se realiza digitalmente la transformada de Fourier del holograma registrado, obteniéndose un orden central y un par de órdenes difractados debido a las franjas de interferencia almacenadas (ver Figura 3). Los órdenes difractados corresponden a la TF del campo del objeto y su complejo conjugado, respectivamente. Luego, se selecciona uno de los órdenes difractados filtrando los términos restantes (como se indica en la Figura 3) y se aplica la transformada de Fourier inversa (IFT), obteniéndose los datos del campo óptico mostrados en la Figura 4. Finalmente, la realización de la TF sobre este campo óptico de datos permite reconstruir el objeto (ver Figura 5).

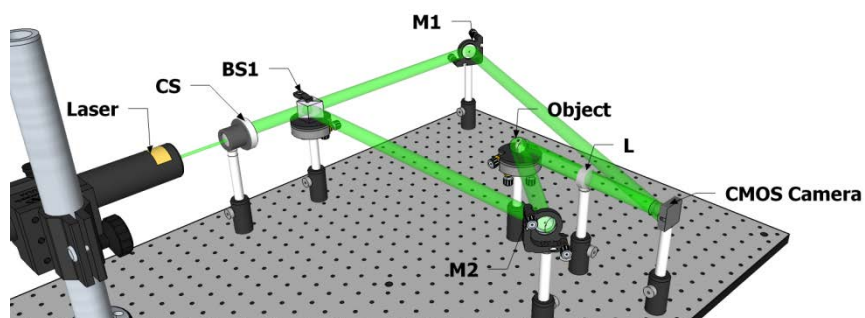


Figura 1: Esquema del arreglo experimental de holografía digital de Fourier fuera de eje (CS: sistema colimador, BS: divisor de haz, M: espejo, L: lente).

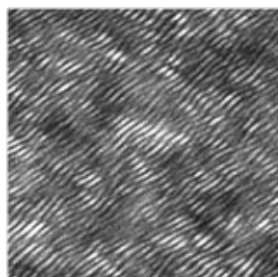


Figura 2: Holograma almacenado en la cámara CCD.

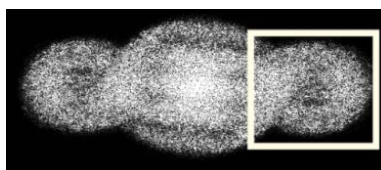


Figura 3: Transformada de Fourier del holograma registrado.

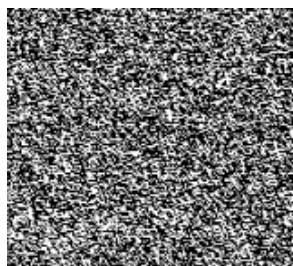


Figura 4: Intensidad del campo óptico obtenido.



Figura 5: Objeto reconstruido cuando no se emplea ninguna técnica de compresión

Aunque la operación de filtrado mencionada anteriormente reduce el volumen de los datos a ser almacenados, buscaremos una alternativa que nos permita comprimir aún más el volumen. En nuestro caso, los datos del campo óptico mostrados en la Figura 4 serán procesados con la técnica de escalado óptico propuesta. El escalado se basa en la formación de la imagen del campo óptico con una lente convergente con un aumento menor a uno, como se indica en la Figura 6. El escalado sobre el campo óptico se realizará digitalmente. El objetivo de la propuesta es disminuir el volumen de los datos procesados. Dado que ese volumen depende del tamaño del dato filtrado, la magnificación  $M$  debe ser menor que 1. Téngase en cuenta que si la magnificación fuese mayor que uno, se produciría un aumento del volumen. En resumen, en nuestro caso los datos del campo óptico se procesarán con el método de escalado óptico para valores de magnificación entre 0 y 1 [12].

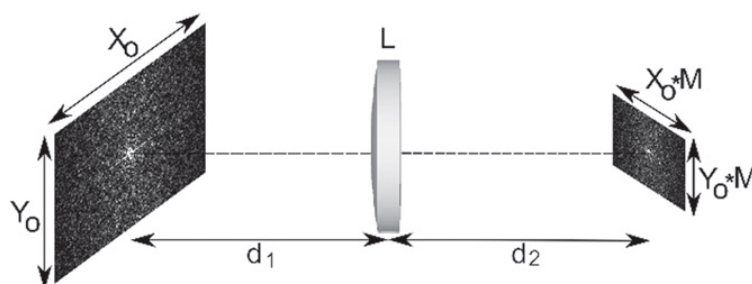


Figura 6: Sistema óptico virtual utilizado para el escalado del campo óptico ( $d_1$ : distancia objeto,  $L$  lente convergente,  $d_2$ : distancia imagen,  $X_0$  y  $Y_0$  tamaño objeto,  $M=d_2/d_1$  magnificación).

El desempeño de la técnica de compresión será cuantificado a través de la evaluación de la diferencia de volumen,

$$\Delta V = V_R - V_C \quad (1)$$

donde  $V_R$  es el volumen del campo óptico sin compresión y  $V_C$  el volumen del campo óptico comprimido. El volumen  $V_C$  es la cantidad de bytes que ocupa el archivo en la memoria de la computadora luego de aplicar el procedimiento de escalado óptico. El volumen será expresado en KB. La misma evaluación se realizará sobre los datos que surjan luego de aplicar la técnica de compresión JPEG.

Como mencionamos anteriormente, las técnicas de escalado óptico y JPEG son técnicas con pérdida, por lo tanto se debe evaluar la calidad de los datos recuperados. En nuestro caso, dicha calidad se determinará mediante el coeficiente de correlación  $CC$  entre los objetos reconstruidos a partir de datos comprimidos y no comprimidos, y definido como:

$$CC = \frac{\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})(B_{mn} - \bar{B})}{\sqrt{\left(\sum_m \sum_n (A_{mn} - \bar{A})^2\right) \left(\sum_m \sum_n (B_{mn} - \bar{B})^2\right)}} \quad (2)$$

donde  $m, n$  son las coordenadas de los píxeles,  $A$  la intensidad del objeto reconstruido a partir del campo óptico no comprimido,  $B$  la intensidad del objeto reconstruido a partir de los datos del campo comprimido y,  $\bar{A}, \bar{B}$  son los valores medios de  $A$  y  $B$ , respectivamente.

Para generar el holograma del cisne (Figura 5) se utiliza un láser de estado sólido (DPSS) bombeado por diodo de la marca Laserglow Technologies con una longitud de onda de 532 nm y una potencia de salida de 50 mW. La figura de interferencia se registra usando una cámara CMOS EO-10012M, con un tamaño de píxel de  $1,67 \mu\text{m} \times 1,67 \mu\text{m}$  y una resolución de 3480 píxeles  $\times$  2748 píxeles. El objeto tiene dimensiones de 18 mm  $\times$  24 mm  $\times$  16 mm. La distancia focal  $L$  de la lente es de 200 mm. Luego del proceso de filtrado, se aplica la transformada de Fourier inversa (IFT) sobre los datos, obteniéndose el campo óptico cuya área es de 940 pixels  $\times$  940 pixels.

Para el escalado, los datos del campo óptico se procesaron para valores de magnificación entre 0 y 1. En cambio en el caso del JPEG, el grado de compresión se controla mediante el factor de calidad (FC) y que puede tomar valores entre 1 y 100. Recordemos que el formato JPEG funciona subdividiendo la imagen de entrada en bloques de 8x8 píxeles. A continuación se aplica una transformada de coseno discreta (DCT) a cada bloque, y se realiza una cuantificación de los componentes de la transformación resultante. Luego, los datos se comprimen adicionalmente mediante la aplicación del método de Huffman [11]. El factor de calidad FC está determinado por el grado de cuantificación de la DCT que es la parte con pérdidas del algoritmo JPEG.

En las Figuras 7 y 8 se presentan las diferencias de volumen  $\Delta V = V_R - V_C$  del campo óptico sin compresión y comprimido en términos del CC, para el escalado óptico y empleando el algoritmo JPEG, respectivamente. Notar que cada punto de la curva de escalado óptico corresponde a una disminución de 0,05 del valor de la magnificación, comenzando en el valor 1, mientras que cada marcador de la curva de compresión JPEG representa una disminución del FC en pasos de 5, comenzando en 100. En las Tablas 1 y 2 se indican las diferencias de volumen, el CC para diferentes valores de la magnificación en el escalado óptico y del factor de calidad FC en el caso del algoritmo de JPEG. La compresión JPEG logra la mayor reducción de volumen en el intervalo FC entre 100 y 45. Notar que una reducción adicional del factor de calidad degrada severamente la calidad del objeto reconstruido para un pequeño aumento en la diferencia de volumen. Por otro lado, el escalado óptico admite una menor pérdida de calidad que la compresión JPEG a altas relaciones de compresión, como se pone en evidencia al observar las Figuras 7 y 8 y las Tablas 1 y 2.

Finalmente, en la Figura 9 a) se muestra la imagen reconstruida sin compresión y en la Figura 9 b) la imagen reconstruida obtenida a partir del campo óptico comprimido empleando el escalado óptico para una magnificación de 0.45. Esta magnificación significa una reducción del 80 % del tamaño en KB del archivo del campo óptico. Además, con respecto al holograma original la compresión resulta para este ejemplo del 96%.

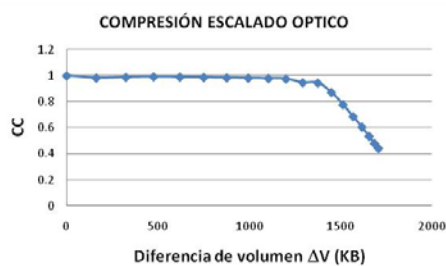


Figura 7: Diferencia de volumen  $\Delta V = V_R - V_C$  en términos del CC para diferentes magnificaciones en el escalado óptico

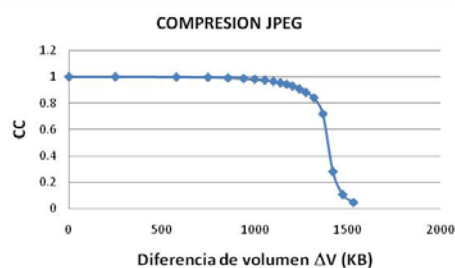


Figura 8: Diferencia de volumen  $\Delta V = V_R - V_C$  en términos del CC para diferentes FC empleando el algoritmo de compresión JPEG

Tabla 1. Diferencia de volumen  $\Delta V = V_R - V_C$  en términos del CC para diferentes magnificaciones en el escalado óptico

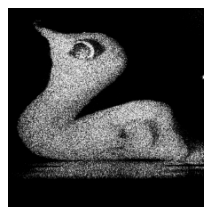
M con escalado óptico	$\Delta V$ (KB)	CC
1	0	1.0000
0.95	162	0.9832
0.9	324	0.9884
0.85	476	0.9927
0.8	620	0.9902
0.75	750	0.9876
0.7	876	0.9849
0.65	994	0.9823
0.6	1104	0.9795
0.55	1200	0.9764
0.5	1292	0.9472
0.45	1374	0.9453
0.4	1448	0.8727
0.35	1512	0.7779
0.3	1567.6	0.6864
0.25	1615.6	0.6056
.2	1655	0.5344
0.15	1684.4	0.4786
0.1	1706.28	0.4408

Tabla 2. Diferencia de volumen  $\Delta V = V_R - V_C$  en términos del CC para diferentes FC empleando el algoritmo de compresión JPEG

FC con JPEG	$\Delta V$ (KB)	CC
100	0	1.0000
95	250	0.9995
90	579	0.9980
85	749	0.9954
80	857	0.9916
75	941	0.9867
70	1001	0.9807
65	1055	0.9733
60	1101	0.9647
55	1139	0.9546
50	1172	0.9433
45	1204	0.9287
40	1241	0.9085
35	1276	0.8809
30	1320	0.8396
25	1368	0.7176
20	1422	0.2791
15	1474.7	0.1048
10	1532.6	0.0447



a)



b)

Figura 9: a) Imagen reconstruida con los datos ópticos sin compresión y b) Imagen reconstruida con el escalado óptico y una magnificación de 0.45

## CONCLUSIONES

En nuestro trabajo se pone de manifiesto que una compresión mediante la técnica JPEG sobre información que contiene ruido no resulta eficiente. Por esa razón, proponemos una alternativa de aplicabilidad en técnicas de holografía digital que ineludiblemente contiene ruido de speckle. A lo largo de la presentación se demuestra que alcanzamos reducciones importantes sin pérdidas significativas de calidad.

## References

- [1] Ulf Schnars, Werner Jueptner Digital Holography. Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques, Springer Verlag, Berlin 2005.
- [2] Velez A, Barrera J F and Torroba R 2015 One-step reconstruction of assembled 3D holographic scenes *Opt. Laser Technol.* **75** 146-50.

- [3] Darakis E and Soraghan J J 2007 Reconstruction domain compression of phase-shifting digital holograms *Appl. Opt.* **46** 351-6.
- [4] Mills G A and Yamaguchi I 2005 Effects of quantization in phase-shifting digital holography *Appl. Opt.* **44** 1216-25.
- [5] Cuche E, Marquet P and Depeursinge C 2000 Spatial filtering for zero-order and twin-image elimination in digital off-axis holography *Appl. Opt.* **39** 4070-75.
- [6] Naughton T J, Frauel Y, Javidi B and Tajahuerce E 2002 Compression of digital holograms for three-dimensional object reconstruction and recognition *Appl. Opt.* **41** 4124-32.
- [7] Wallace G K 1992 The JPEG still picture compression standard *IEEE Trans. Consum. Electron.* **38**xviii – xxxiv.
- [8] Shahnaz R, Walkup J F and Krile T F 1999 Image compression in signal-dependent noise *Appl. Opt.* **38** 5560-7
- [9] Darakis E and Soraghan J J 2006 Compression of interference patterns with application to phase-shifting digital holography *Appl. Opt.* **45** 2437-43.
- [10] Trejos S, Barrera J F, Velez A, Tebaldi M and Torroba R 2016 Optical approach for the efficient data volume handling in experimentally encrypted data *J. Opt.* **18** 065702
- [11] Huffman D A 1952 A Method for the Construction of Minimum-Redundancy Codes *Proceedings of the I.R.E.* 1098-101.
- [12] Trejos S, Barrera J F, Velez A, Tebaldi M and Torroba R 2016 Optical approach for the efficient data volume handling in experimentally encrypted data *J. Opt.* **18** 065702.



## ESPECTRO MULTIFRACTAL PARA FAMILIAS DE FUNCIONES UNIDIMENSIONALES

**Mesón, Alejandro M. y Vericat, Fernando**

Grupo de Aplicaciones Matemáticas y Estadísticas de la Facultad de Ingeniería (GAMEFI) Departamento de Ciencias Básicas

Correo: meson@iflysib.unlp.edu.ar, vericat@iflysib.unlp.edu.ar

Por un sistema dinámico entendemos simplemente un espacio  $X$  (espacio fase) con una función que transforma cada punto de  $X$  en otro punto de  $X$ . El espacio  $X$  puede ser considerado como parte de la recta real, del plano o del espacio tridimensional, o más generalmente espacios abstractos con determinadas estructuras (espacios de probabilidad, espacios métricos o topológicos etc). La función debe preservar tales estructuras. Las órbitas o trayectorias de un punto  $x$  perteneciente a  $X$ , hasta “tiempo”  $n$ , está formada por los puntos  $x_0 = x, x_1 = f(x), \dots, x_{n-1} = f^{n-1}(x)$ , en el área de Sistemas Dinámicos se estudia esencialmente el comportamiento y distribución de las órbitas. Un importante tema en esta disciplina es estimar la frecuencia de visitas de órbitas a determinadas regiones. Podemos modelar esto por distribuciones en “manchas frías”, o sea donde hay menos visitas y “manchas calientes” donde hay más. Esto dependerá de una escala. Si subdividimos el espacio en una grilla de conjuntos  $B_i$  con tamaño  $r_i$  (tamaño por ejemplo=volumen o área) y si  $p_i$  =volumen o área de  $B_i$ , entonces  $p_i$  es la distribución de manchas frías y calientes. La escala está dada por los exponentes  $p_i = r_i^\alpha$ . Esto da una “estructura multifractal”. Más generalmente el Análisis Multifractal” trata con la descomposición de un conjunto en conjuntos de nivel (espectro multifractal) de la forma

$$K_\alpha = \{x : h(x) = \alpha\}, \text{ para una cierta función } h.$$

Si bien estos conjuntos tienen una estructura geométrica compleja, pueden describirse por funciones con un “buen comportamiento” (*milagro multifractal*). Los multifractales se aplican entre otras áreas en distribución de galaxias, turbulencia, crecimiento celular, redes de tráfico, distribución espacial de combustible y minerales, temas financieros, etc.

En esta comunicación consideramos la familia de funciones  $f_a : X \rightarrow X, X = [-1,1]$  definida por  $f(x) = 1 - ax^2, 0 < a < 2$  (*funciones de Benedicks-Carleson*), la suma de Birkhoff para un potencial  $\varphi : X \rightarrow \mathbf{R}$  y dinámicos  $f$  se define como

$$S_n(\varphi)(x) = \sum_{i=0}^{n-1} \varphi(f^i(x)),$$

el espectro a analizar es el cociente de sumas de Birkhoff

$$K_{\alpha, \varphi, \psi} = \left\{ x : \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S_n(\varphi)(x)}{S_n(\psi)(x)} = \alpha \right\}$$

El resultado principal es la descripción de la dimensión de Hausdorff (o dimensión fractal) del conjunto multifractal  $K_{\alpha, \varphi, \psi}$  por una fórmula variacional.

*Palabras clave: Espectro multifractal, sumas de Birkhoff, funciones unidimensionales*

## INTRODUCCION

Como mencionamos anteriormente por un sistema dinámico entendemos un espacio fase  $X$  con una función  $f$  (dinámico) que transforma cada punto de  $X$  en otro punto de  $X$ . Esto lo podemos visualizar de la siguiente manera sea  $x_i$  un punto de  $X$  entonces  $x_i$  se transformará en el punto  $x_{i+1} = f(x_i)$ . En Teoría Ergódica se consideran las transformaciones de cada punto  $x$  en los puntos  $x_0 = x, x_1 = f(x), \dots, x_{n-1} = f^{n-1}(x)$ . Cada uno de los puntos así obtenidos se llaman las *órbitas de  $x$* .

Los denominados promedios ergódicos son promedios de funciones reales definidas sobre  $X$  a lo largo de las órbitas de puntos pertenecientes a tal espacio. Al sistema dinámico formado por el par  $(X, f)$  se le agregará una medida de probabilidad  $\mu$  sobre  $X$  de modo que tendremos un espacio de probabilidad. Recordemos que las sumas de Birkhoff, o sumas estadísticas, se definen de la siguiente manera: sea  $\varphi$  una función definida sobre  $X$  a valores reales, la suma de Birkhoff de orden  $n$  en el punto  $x$  es

$$S_n(\varphi)(x) = \sum_{i=0}^{n-1} \varphi(f^i(x)) \quad (1)$$

El teorema ergódico de Birkhoff establece la convergencia del promedio ergódico  $\frac{1}{n} S_n(\varphi)(x)$  cuando  $n \rightarrow \infty$ . Tal convergencia se da para todos los puntos del espacio excepto en un conjunto de elementos que tiene lo que denomina medida nula, esto es la probabilidad  $\mu$  de cada uno de esos conjuntos es 0. En general la motivación para estudiar este tipo de promedios es disponer de una descripción cualitativa del comportamiento global de las órbitas, lo cual es de interés especialmente en relación a sistemas tan complejos que una descripción detallada de las mismas es poco menos que imposible.

Una estructura fractal puede aparecer por ejemplo de la siguiente manera, supongamos que tomamos un segmento, lo subdividimos en tres partes y le quitamos la central, a cada de las partes que quedan las volvemos a subdividir y nos quedamos con las dos de los extremos y así, nos quedaría un conjunto cuya dimensión no es cero ni tampoco 1, es un conjunto de dimensión fractal (fraccionaria). Un caso de fractalidad puede ocurrir si se quiere medir la longitud de una costa, se van tomando aproximaciones por segmentos lo que daría un conjunto de naturaleza fractal cuya dimensión está entre uno y dos. El Análisis Multifractal consiste como, su nombre lo indica, en considerar varias estructuras fractales por medio de una descomposición del espacio  $X$  en conjuntos de nivel de naturaleza fractal. El problema es describir tales conjuntos por medio de diversas funciones (entropía topológica, dimensión de Hausdorff, etc) que miden la dimensión de estos conjuntos, que, según dijimos, no tiene por que ser entera. Aquí de nuevo se trata de lograr una descripción cualitativa de sistemas dinámicos cuya complejidad hace imposible un estudio más

detallado. Tal es el caso de la predicción del clima visto como la manifestación de un sistema dinámico muy complejo.

Como puntualizamos antes el Análisis Multifractal consiste en considerar una descomposición del espacio fase en conjuntos de nivel y desarrollar un formalismo para describir su dimensión de Hausdorff (u otra dimensión) por medio de función que en lo posible muestre un “buen comportamiento”. Recordemos que la descomposición a considerar es el espectro correspondiente a cocientes de sumas de Birkhoff

$$K_{\alpha, \varphi, \psi} = \left\{ x : \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S_n(\varphi)(x)}{S_n(\psi)(x)} = \alpha \right\}$$

donde los dinámicos estarán dados por funciones  $f: X \rightarrow X$ ,  $X = [-1, 1]$  (funciones de Benedicks-Carleson) definidas por  $f_a(x) = 1 - ax^2$ ,  $0 < a < 2$ , con ciertas propiedades, fundamentalmente el hecho que hay un conjunto  $A \subset (0, 2)$  tal que  $f = f_a$  en  $A$ . La descripción de espectros multifractales para funciones en una dimensión fue estudiada extensivamente para funciones que no tienen puntos críticos, para el caso de las funciones de Benedicks-Carleson **(1)**, que tienen un punto crítico en  $x_0 = 0$ , Chung y Takahasi **(2)** efectuaron una descripción multifractal pero no para cocientes, sino para una sola suma de Birkhoff. El problema de la descripción de espectros multifractales de promedios ergódicos para funciones sin puntos críticos o sistemas uniformemente hiperbólicos fue bastante estudiado, por ej **(3),(4),(5),(6)**. El propósito de esta comunicación es continuar con el análisis para cocientes de promedios ergódicos. La presencia de puntos críticos dificulta la obtención de una representación simbólica. En el caso tratado por Iommi y Jordan **(3)** estos realizan una descripción multifractal para cocientes de promedios ergódicos pero para una clase de funciones unidimensionales sin puntos críticos, los cuales son conjugados a un espacio simbólico lo cual hace la representación más directa. Los potenciales considerados pertenecerán a una clase de funciones de distorsión acotada que denotamos por  $C_f$  y que luego explicitaremos como está constituida. Además denotamos

$$\bar{\alpha} = \sup \left\{ \lim \frac{S_n(\varphi)(x)}{S_n(\psi)(x)} \right\}$$

$$\underline{\alpha} = \inf \left\{ \lim \frac{S_n(\varphi)(x)}{S_n(\psi)(x)} \right\}$$

## RESULTADO PRINCIPAL

Por  $D(Z)$  denotamos la dimensión de Hausdorff o dimensión fractal del conjunto  $Z$ . Con  $h(\mu)$  y  $\lambda(\mu)$  denotamos respectivamente la entropía y el exponente de Lyapunov de medida  $\mu$ .

**Teorema:** Consideremos un conjunto de parámetros  $a$  tal que  $f = f_a$ , con  $f_a$  una familia de funciones de Benedicks-Carleson; sean  $\varphi, \psi \in C_f$  con  $\varphi, \psi$  tal que  $S_n(\psi)(x) > n\eta$ , para alguna constante  $\eta$  y para todo  $n$ , entonces para todo  $\alpha \in (\underline{\alpha}, \bar{\alpha})$  es valido

$$D(K_{\alpha, \varphi, \psi}) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sup \left\{ \frac{h(\mu)}{\lambda(\mu)} : \int \varphi d\mu \in (\alpha - \varepsilon, \alpha + \varepsilon) \right\},$$

donde el supremo se toma sobre todas las medidas  $f$  invariantes  $\mu$  con  $\int \varphi d\mu < \infty$

La continuidad del espectro puede analizarse de manera similar a lo hecho en (3), una vez que se estableció la formula variacional del teorema. Sean los conjuntos

$$\bar{A} = \sup \left\{ \alpha : \text{existe una secuencia } x_n \text{ con } x_n \rightarrow 0 \text{ y } \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{\varphi(x_n)}{\psi(x_n)} = \alpha \right\}$$

$$\underline{A} = \inf \left\{ \alpha : \text{existe una secuencia } x_n \text{ con } x_n \rightarrow 0 \text{ y } \liminf_{n \rightarrow \infty} \frac{\varphi(x_n)}{\psi(x_n)} = \alpha \right\}$$

y sea  $J = (\underline{\alpha}, \bar{\alpha}) - (\underline{A}, \bar{A})$ . Luego la función  $\alpha \in J \rightarrow D(K_{\alpha, \varphi, \psi})$  es continua.

### Bosquejo de la demostración del teorema:

Un asunto fundamental para la obtención del resultado variacional del teorema es la construcción de particiones del intervalo  $X = [-1, 1]$ , o mas precisamente un subintervalo de este, para poder tener una representación simbólica del sistema. Como mencionamos anteriormente la presencia de un punto crítico hace necesario que se diseñen tipos especiales de técnicas para tales construcciones. Estos métodos se denominan *esquemas inducidos*, o *torres*. La idea fundamental en (2) es es la construcción de esquemas inducidos con una propiedad especial de recurrencia, esto es considerar un entorno  $I = (-\delta, \delta)$  del punto critico  $x_0 = 0$  y estudiar como retornan las orbitas de los puntos de  $I$ . Las orbitas de las funciones de Benedicks-Carleson fueron estudiadas justamente por estos autores y fueron clasificadas en distintos tipos según el retorno. La idea fundamental de Chung y Takehasi es analizar el crecimiento de la derivada fuera del entorno. Damos una breve descripción de las técnicas utilizadas, se comienza con una subdivisión del intervalo  $I = (-\delta, \delta)$ , a partir de la subdivisión se obtiene una partición  $\bar{P}_n$  del intervalo  $\bar{X} = [-\bar{x}, \bar{x}]$ , donde  $\bar{x}$  es un punto fijo de  $f$  en  $X$ . En los miembros de esta partición se verifica una propiedad de distorsión acotada para las derivadas de  $f$ . Además a partir de la subdivisión del entorno del punto crítico se obtiene un conjunto  $A$ , formado por algunos elementos de tal partición. Inductivamente se define a partir de  $A$  una nueva partición intervalos  $Q$  una función de tiempo de retorno  $R: Q \rightarrow \mathbf{N}$ . Finalmente se consideras “torres”

$\Delta = \{(x, l) : x \in A, l \in \{0, 1, \dots, R(x) - 1\}\}$  sobre las cuales  $f$  induce una función  $\bar{f}$ , que es interpretada como un ascenso de cada punto  $(x, l)$  a la torre y un descenso al “piso”

$(f^{R(x)}, 0)$ . Una partición  $P_n$  inducida de  $\bar{P}_n$  puede llevarse a la torre  $\Delta = \{(x, l) : R > l\}$ , formada por las “colas” de la función de tiempo de retorno. Llamamos a esta partición también  $P_l$  y además  $D = \bigcup_n P_n$  es una partición de las denominadas de Markov. Este tipo de particiones permiten tener una representación simbólica del sistema, esto es una aplicación suryectiva y continua sobre un espacio simbólico de secuencias en un alfabeto finito. Si  $D^n$  es lo que se llama el refinamiento por “nombres de longitud n” de  $D$  entonces

$$D_0^n = \left\{ D^n \in \Delta_0 : \left| \frac{S_n(\varphi)(x)}{S_n(\psi)(x)} - \alpha \right| < \varepsilon \right\}, \text{ para algún } x \in D^n.$$

Una herradura para una función  $f$  es una colección de intervalos con ciertas propiedades. El nombre genérico de herradura surge por la construcción, de conjuntos con esta forma, hecha por Smale para sistemas hiperbólicos. De la base de la partición  $D_0^n$  se puede extraer una colección de intervalos  $I_1, I_2, \dots, I_M$  que resultan una herradura para  $F = f^r$  para un cierto natural  $r$ . Así obtenemos una conjugación (función suryectiva y continua) entre un espacio de secuencias en  $M$  símbolos y  $\Lambda$ . La clase  $C_f$  que mencionamos en el enunciado del teorema está formada por todas las funciones  $\varphi$  tales que hay un número  $K$  de manera que para todo  $n$  suficientemente grande se verifica que si  $x, y \in P_n$  entonces  $|S_n(\varphi)(x) - S_n(\varphi)(y)| < K$ .

Para la demostración del teorema usamos el siguiente resultado: Sean  $\varphi, \psi \in C_f$  y tal que  $S_n(\psi\varphi)(x) > n\eta$  entonces para un dado  $\varepsilon > 0$  para todo  $x, y \in P_n$  se verifica

$$\left| \frac{S_n(\varphi)(x)}{S_n(\psi)(x)} - \frac{S_n(\varphi)(y)}{S_n(\psi)(y)} \right| < \varepsilon \text{ para } n \text{ suficientemente grande.}$$

Para obtener la cota superior de la fórmula variacional a demostrar se utiliza para calcular la dimensión fractal un

cubrimiento de  $K_{\alpha, \varphi, \psi}$  por conjuntos de la partición  $D_0^n$ , sea  $s_n = \inf \left\{ s : \sum_{A \in D_0^n} |A|^s \leq 1 \right\}$ , por

definición de dimensión de Hausdorff  $D(K_{\alpha, \varphi, \psi}) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} s_n$ . Luego para establecer la cota superior se relaciona a este límite con medidas soportadas sobre la herradura. La representación simbólica a partir de la herradura permite definir una secuencia de medidas

$m_n$  que tal que  $\frac{h(m_n)}{\lambda(m_n)}$  aproxima a  $s_n$ , de esta forma y usando el resultado de distorsión

acotada descrito al principio de este párrafo se obtiene, luego de algunos cálculos, la cota superior deseada.

Para la cota inferior se usan las construcciones de (1) para obtener un fractal  $F$  y una medida  $\nu$  tal que  $\nu(F) = 1$ . La dimensión de una medida  $\nu$  en punto  $x$  se define como se

define como  $D_\nu(x) = \lim_{\eta \rightarrow 0} \frac{\nu(B_\eta(x))}{\log \eta}$ , donde  $B_\eta(x)$  es la bola de centro  $x$  y radio  $\eta$ . Se

tiene además que  $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{S_n(\varphi)(x)}{S_n(\psi)(x)} = \alpha$ , para todo  $x \in F$ . Luego se prueba que

$$D_v(x) \geq \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sup \left\{ \frac{h(\mu)}{\lambda(\mu)} : \frac{\int \varphi d\mu}{\int \psi d\mu} \in (\alpha - \varepsilon, \alpha + \varepsilon) \right\}, \quad \text{para todo } x \in F. \quad \text{Finalmente por el}$$

llamado lema de volumen **(8)**, teniendo en cuenta que el fractal  $F$  tiene medida total, se puede afirmar que

$$D(K_{\alpha, \varphi, \psi}) \geq \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \sup \left\{ \frac{h(\mu)}{\lambda(\mu)} : \frac{\int \varphi d\mu}{\int \psi d\mu} \in (\alpha - \varepsilon, \alpha + \varepsilon) \right\}.$$

### CITAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) M. Benedicks and I. Carleson , On iterations of  $f(x) = 1 - ax$  on  $(-1, 1)$ , *Acta Math.* **122**, (1985) 1-25.
- (2) Y. Moo Chung and H. Takahasi, Multifractal formalism for Benedicks.Carleson quadratic maps, *Erg. Th & Dynan. Sys.* **34**, (2014) 1116-1141.
- (3) G. Iommi and T. Jordan, Multifractal Analysis for quotients of Birhoff sums for countable Markov maps, *Int. Math. Reserch Notices*, vol **2015**, (2015) 460-498.
- (4) Y. Pesin and H. Weiss, A multifractal analysis of equilibrium measures for confoemal expanding maps and Moran-like constructions, *J. Stat. Phys*, **86**, (1997) 233-275.
- (5) V. Climenhaga, Bowen ´s equation in non-uniform setting, *Erg. Th & Dynan. Sys.* **31**, (2011) 1163-1182.
- (6) L. Barreira and J. Scmeling, sets of “non-typical” points have full Hausdorff dimension and full topological entropy, *Israel J. Math.* **116**, (200) 29-70. .
- (7) H. Weiss, The Lyapunov spectrum for conformal mappings and Axiom-A surface diffeomorphisms, *J. Stat. Phys*, **95**, (1999) 615-632.
- (8) Y. Pesin, *Dimension Theory in Dynamical Systems*, University of Cichago Press, IL (1997). .



## APLICACIÓN DE MODELOS DE PUNTO DE CAMBIO PARA EL ANÁLISIS DE LA FLUCTUACIÓN DE PRESIÓN EN FLUJO TURBULENTO

Maria V. Calandra<sup>b</sup>, Julio Marañón Di Leo<sup>a,c</sup>, Juan S. Delnero<sup>a,c</sup>, Santiago Algozino<sup>a,c</sup>

<sup>a</sup>UIDET de Capa Límite y Fluidodinámica Ambiental, Departamento de Aeronáutica,

<sup>b</sup>UIDET Grupo de Aplicaciones Matemáticas y Estadísticas de la Facultad de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, calle 1 y 47, La Plata (1900), Pcia. Buenos Aires.

<sup>c</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

jmaranon@ing.unlp.edu.ar

**Palabras Clave:** Test de Hipótesis, Punto de cambio, Turbulencia, Presiones.

### INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo mostramos los resultados obtenidos de la aplicación de la herramienta estadística basada en algoritmos de punto de cambio (CPM – Change Point Model) [1], con el objetivo de determinar cambios en una señal de fluctuaciones de la presión determinadas en un ensayo experimental en túnel de viento, con el objeto de analizar y detectar los efectos sobre el campo fluidodinámico de un comando sometido a la acción de una hélice operando en las inmediaciones del borde de fuga de un ala. En estos ensayos buscamos establecer las características de los efectos producidos sobre la operación del comando. En este caso se trata de un flap simple operando en el borde de fuga de un ala sometido a los efectos de una hélice en configuración pusher cercana al flap. Los modelos CPM se aplican ampliamente en la detección de cambios en variables aleatorias en una vasta variedad de procesos y problemas. En nuestro caso hemos implementado, previamente [2-4], los modelos CPM para el análisis de señales de las fluctuaciones turbulentas de la velocidad obteniendo muy buenos resultados, logrando establecer las escalas de eventos turbulentos, con iguales resultados de los que se consiguen con las herramientas estadísticas clásicas para este tipo de estudios.

En este caso implementamos los algoritmos CPM en las señales de presión procesadas y se han podido comparar los resultados obtenidos con aquellos que se obtienen mediante los tratamientos habituales en este tipo de estudios. De esta manera demostramos la aplicabilidad de los modelos CPM permitiendo generar una nueva herramienta de análisis, y con la particularidad de que estos algoritmos son utilizables, también, en tiempo real con la posibilidad de poder detectar en el mismo ensayo las características particulares de la fluctuación de las presiones.

### METODOLOGÍAS

#### Experimental

Para la aplicación de la herramienta estadística basada en algoritmos CPM se consideraron las mediciones en túnel de viento que se vienen realizando sobre un comando de flap en un ala. El modelo de ala para el ensayo contó con un perfil aerodinámico NACA 2412, siendo sus dimensiones de una envergadura ( $b$ ) de 80 cm. con una cuerda ( $c$ ) constante de 30 cm., en la misma se le incorporó un flap simple móvil de una envergadura de 40 cm. con una cuerda ( $c_f$ ) constante del 35% de  $c$ . (ver Figura 1).

Se ubicó un soporte adherido al techo del Túnel de Viento para montar al motor, se utilizó una hélice de madera 4x8 pulgadas (radio de la pala  $R \cong 18$  cm.) y un sistema de control asociado para el motor. El motor fue ubicado estableciendo un ángulo de empuje de  $6,25^\circ$

respecto de la horizontal, obteniéndose un ángulo de  $8,75^\circ$  relativo al modelo, ya que el mismo se ubicó con un ángulo de incidencia geométrico de  $2,5^\circ$  (ver Figura 2)

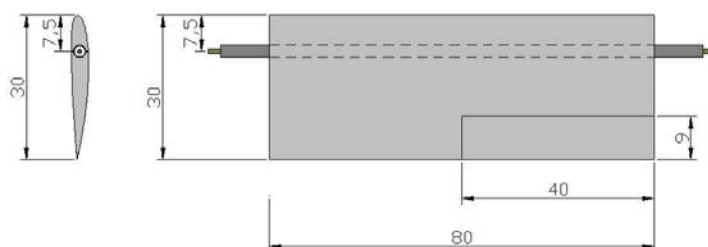


Figura 1: Datos geométricos del modelo utilizado.

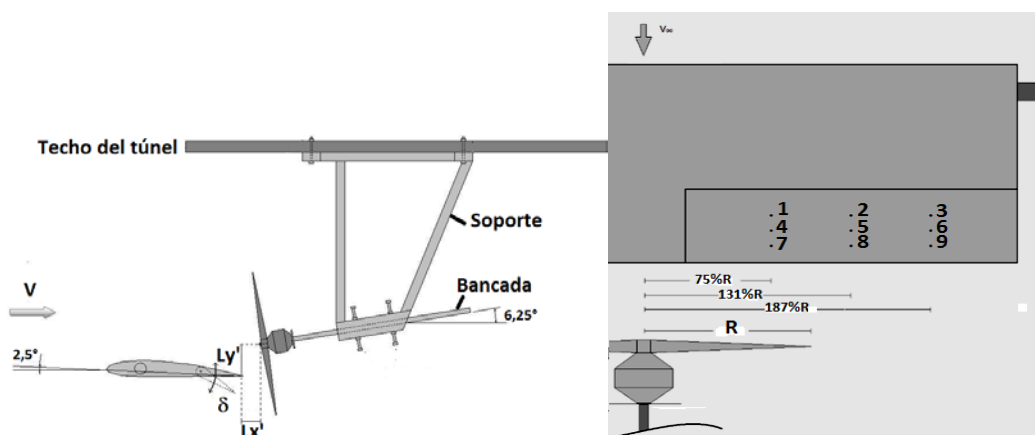


Figura 2: Esquema del montaje de la medición y tomas de presión sobre en el modelo.

El plano rotor de la hélice se ubicó, como muestra la Figura 2, de tal forma que el eje de propulsión se ubicaba en dos posiciones respecto al borde de fuga del modelo. Las posiciones relativas se muestran en la Tabla 1.

Posiciones relativas entre flap y hélice	P0	P1
	( $Lx' = 7\%$ C)	( $Lx' = 11,6\%$ C)
$Lx'$ [m]	0,021	0,035
$Ly'$ [m]	0,047	0,056

Tabla 1: Posiciones relativas del motor respecto al modelo.

Los ensayos fueron realizados con una configuración del flujo, en la sección de prueba, con la mínima intensidad de turbulencia para este Túnel de Viento que es de 1,8%. Como equipamiento se contó con un sistema de medición de presiones de la marca Scanivalve, utilizándose módulos del modelo DSA3217-16px. El modelo incorporó tomas de presión en la superficie del flap, siendo 9 tomas en el intradós y otras 9 tomas en el extradós, en posiciones homologas en cada lado. (ver Figura 2). Las tomas 1, 4 y 7 se encontraban a una distancia del eje de la hélice correspondiente al 75% de R (13,34 cm.), las tomas 2, 5 y 8 se ubicaban al 131% de R (23,34 cm.) y las tomas 3, 6 y 9 en la posición de 187% de R (33,34 cm.), y ubicadas según la dirección de la cuerda a 2,5 cm. desde el borde de ataque del flap y entre sí. El total de mediciones realizadas incluyó, las dos posiciones relativas de la hélice P0 y P1, y la variación de los parámetros de deflexión del flap ( $\delta$ ) y las RPM del motor, con los valores presentados en la Tabla 2.

Deflexión del flap ( $\delta$ )	0°	10°	20°	30°
RPM del motor	0	4000	6000	

Tabla 2: Posiciones de la deflexión del flap y revoluciones del motor empleadas.

Las mediciones fueron realizadas considerando una frecuencia de muestreo de 500 Hz. obteniéndose un total de 7500 valores con una duración de 15 segundos por muestra.

Debido a que el objetivo del presente trabajo no es el de mostrar los resultados específicos del ensayo sino la aplicación de la metodología descrita previamente (modelos CPM) en lo que sigue presentaremos algunos resultados, necesarios para realizar una comparación y análisis respecto de las determinaciones realizadas con dicha metodología. En las referencias [5-7] se realiza un análisis más detallado de los resultados. Vemos en la Figura 4 los valores de la fluctuación de la presión para la posición P0, sin deflexión del flap y con la hélice a 6000 RPM.



Figura 3: Visualizaciones con humo del flujo sobre el ala en vista posterior a distintas RPM.

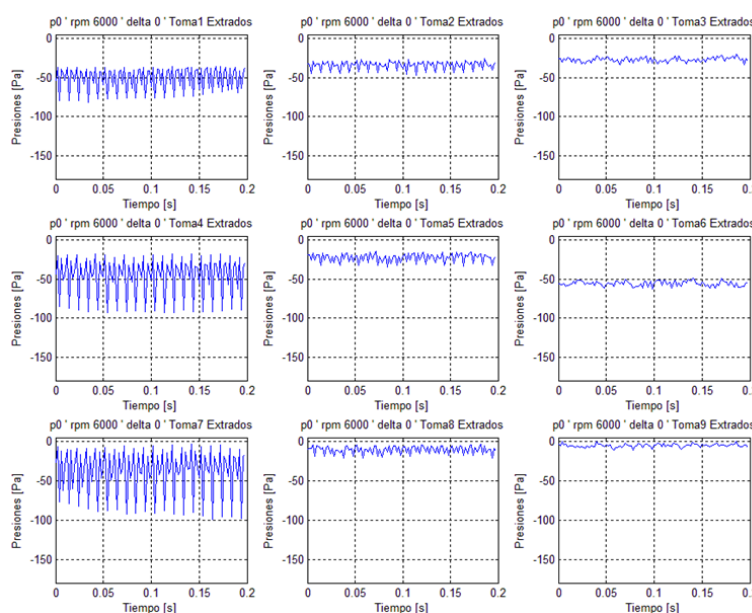


Figura 4: Valores de la presión para todas las tomas en la configuración P0,  $\delta = 0^\circ$  y 6000 RPM. [8]

Allí observamos que se producen altas fluctuaciones de la presión en las tomas 1, 4 y 7 que se corresponden exactamente con la posición al 75% del radio de la pala, donde se producen las mayores cargas sobre la misma y a su vez se incrementan de la toma 1 hacia la toma 7, es decir en la dirección de la cuerda hacia el borde de fuga, reduciéndose significativamente para las demás tomas, que se encuentran alejadas de la pala. Estos resultados muestran claramente la influencia de la pala sobre el comando de flap, a pesar de que el mismo no se encuentra deflectado. Además, mostramos resultados del análisis espectral realizado mediante la aplicación de la transformada de Fourier a los datos de la presión fluctuante. En la Figura 5 se observa el caso para los mismos datos presentados en

la Figura 4. Aquí se observa la concordancia del máximo del espectro en cada caso relacionado con la frecuencia de pasaje de la pala, que para el caso de 6000 RPM se encuentra en 200 Hz. aproximadamente. Se encuentra en análisis la explicación de los máximos secundarios que se presentan, lo cual puede ser debido a diferentes factores, entre ellos un desbalance de la hélice, algún acople mecánico o fluidodinámico, etc. Se observa que el máximo secundario decrece hacia las tomas más alejadas de la pala, tanto en envergadura como en la cuerda. Explicable dado la energización que induce la pala sobre el campo del fluido.

### Estadística

En trabajos previos [2-4], se realizaron estudios para analizar la aplicación de modelos de punto de cambio (Change Point Model, CPM), utilizados para detectar desviaciones en una señal sensada, en estos casos resulto ser la señal de la velocidad turbulenta fluctuante del aire en campos de velocidades de estelas, obteniéndose muy buenos resultados para el análisis del flujo. En el presente trabajo se consideran, nuevamente, tests no paramétricos

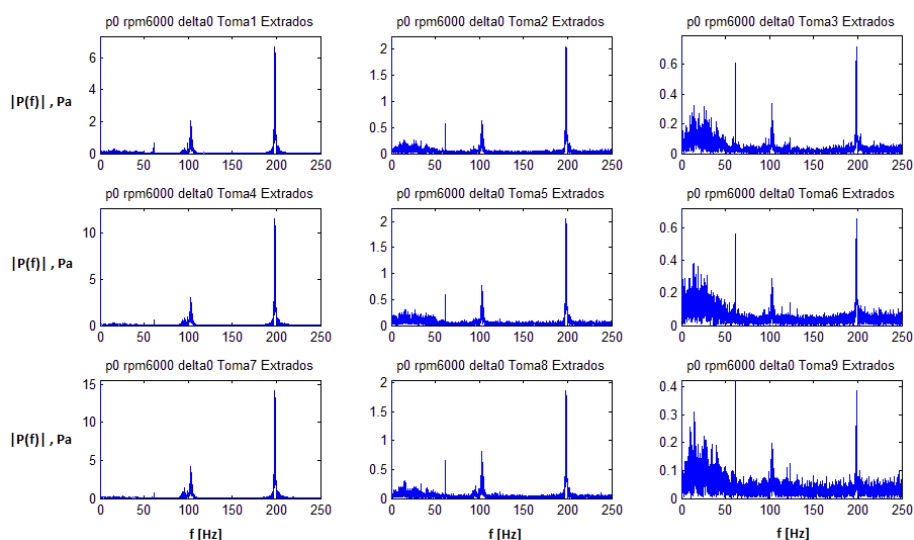


Figura 5: Transformada de Fourier de cada señal para el extradós en la configuración P0,  $\delta = 0^\circ$  y 6000 RPM. [8]

aplicados a las señales de las mediciones de las fluctuaciones de la presión, para la implementación del modelo CPM, utilizando para la aplicación del algoritmo de detección rutinas codificadas en lenguaje R (<https://cran.r-project.org/web/packages/cpm/index.html>) [8], las cuales son de dominio público, empleando el tests de Cramer-von Mises (CPM-CvM) [9].

## RESULTADOS

Se analizaron, mediante la metodología CPM, algunas configuraciones de medición que presentaban situaciones del comportamiento del flujo diferentes, con el fin de probar los algoritmos para establecer el nivel de detección en estas situaciones particulares. Se aplicó el análisis de Fase I, es decir, con todos los valores de la muestra en forma completa luego de finalizada la medición, y no en tiempo real. De los cálculos realizados mostramos un caso particular, a modo de ejemplo, mediante una tabla de detecciones (ver Figura 6), asociada a la señal para la configuración P0, 0 RPM y  $\delta = 0^\circ$  en la toma 1, solamente para las primeras 14 detecciones, la cuales se representan en la Figura 6, en la misma se observa en líneas punteadas las posiciones de los cambios detectados en la señal.

Cambio	Tiempo [s]
1	0,008
2	0,032
3	0,058
4	0,08
5	0,1
6	0,12
7	0,188
8	0,2
9	0,228
10	0,244
11	0,264
12	0,296
13	0,312
14	0,334

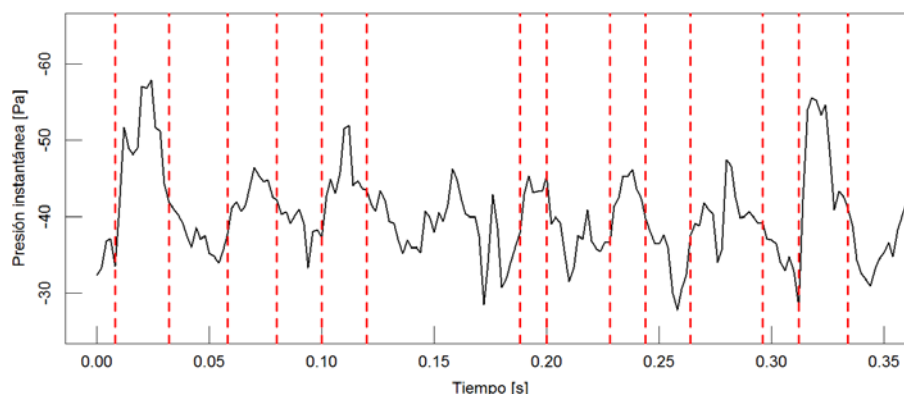


Figura 6: Tabla y gráfica de los cambios detectados en la presión en el extradós del flap en la toma 1 (primeros 0,35 segundos de la señal, para P0,  $\delta = 0^\circ$  y 0 RPM).

Aplicando la metodología se realizó un estudio de todos los datos, por la cantidad de información se presenta como ejemplo el análisis realizado en el promedio de cambios detectados y las frecuencias promedio de cambio para la configuración de estudio P0, para 0 RPM,  $\delta = 0^\circ$  y  $\delta = 30^\circ$  para las mediciones en el extradós (ver Tabla 4). En este caso se observa, para cada toma correspondiente, una disminución del promedio de cambio en el tiempo y, por consiguiente, un incremento en la frecuencia promedio de cambio para todas las tomas de medición sobre el flap al pasar de deflexión  $0^\circ$  a  $30^\circ$ . Este comportamiento era esperable puesto que se generan desprendimientos de flujo sobre el flap que generan mayores frecuencias sobre la fluctuación de la presión. A su vez se observa en los valores que al acercarnos a la hélice en la cuerda (es decir al acercarnos al borde de fuga) las frecuencias decrecen cuando  $\delta = 0^\circ$ , aunque se notan algunas fluctuaciones para valores cercanos a la hélice sin rotar. Luego para las tomas 3, 6 y 9 en la punta de ala, con el flap a  $\delta = 30^\circ$  las frecuencias se incrementan por los desprendimientos del flujo en esta región del flap (en promedio entre 32 y 33 Hz.), y en las restantes tomas para esta deflexión las frecuencias fluctúan entre 27 a 30 Hz., aproximadamente.

Toma	$\delta = 0^\circ - \text{RPM} = 0$			$\delta = 30^\circ - \text{RPM} = 0$		
	1	2	3	1	2	3
Promedio de cambio [s]	0,039	0,041	0,038	0,031	0,034	0,031
Frecuencia promedio [Hz]	25,57	24,68	26,10	32,52	29,32	32,21
	5	2		0	1	7
Toma	4	5	6	4	5	6
Promedio de cambio [s]	0,042	0,056	0,053	0,035	0,037	0,030
Frecuencia promedio [Hz]	23,78	17,94	18,93	28,44	27,01	33,23
	5	9	6	9	3	2
Toma	7	8	9	7	8	9
Promedio de cambio [s]	0,042	0,068	0,067	0,035	0,033	0,031
Frecuencia promedio [Hz]	23,56	14,61	14,90	28,82	30,04	32,25
	6	0	9	7	1	0

Tabla 3: Promedios de cambio y frecuencias promedio para los cambios detectados en la señal de presiones en el extradós para las distintas tomas, a 0 RPM,  $\delta = 0^\circ$  y  $\delta = 30^\circ$ .

De los análisis realizados se observó que no se detectaban cambios en la señal en varios casos, además las detecciones mostraban similares resultados para las configuraciones P0 como P1. Por ello analizamos los resultados en una configuración, para mostrar una tendencia de los resultados. Observamos que cuando  $\delta = 0^\circ$ , las tomas más cercanas a la pala (1, 4, 7 y 2, 5, 8) no mostraban resultados de detección de cambios, si aparecían cambios en las tomas 3, 6 y 9, que son las más alejadas a la hélice en la envergadura del

		$\delta = 0^\circ$ - RPM = 6000			$\delta = 30^\circ$ - RPM = 6000		
Posición P1	Toma	1	2	3	1	2	3
	Promedio de cambio [s]	S/D	S/D	0,077	S/D	0,036	0,031
	Frecuencia promedio [Hz]	S/D	S/D	13,01	S/D	27,50	32,631
	Toma	4	5	6	4	5	6
	Promedio de cambio [s]	S/D	S/D	0,058	S/D	0,047	0,035
	Frecuencia promedio [Hz]	S/D	S/D	17,30	S/D	21,46	28,915
	Toma	7	8	9	7	8	9
	Promedio de cambio [s]	S/D	S/D	0,087	S/D	0,039	0,035
	Frecuencia promedio [Hz]	S/D	S/D	11,50	S/D	25,35	28,896

Tabla 5 Promedios de cambio y frecuencias promedio para los cambios detectados en las presiones en el extradós para las distintas tomas, a 6000 RPM,  $\delta = 0^\circ$  y  $\delta = 30^\circ$  y P1. (S/D: sin detección de cambios en la señal)

flap, en las mismas se observaba una variabilidad en las frecuencias, no pudiéndose establecer una tendencia clara. Sin embargo, cuando se producía la deflexión del flap con  $\delta = 30^\circ$ , se presentaba una tendencia clara. Primero, solamente las tomas 1, 4 y 7 no presentaban detección de cambios (tomas más cercanas a la hélice en la envergadura), luego las frecuencias crecían en envergadura hacia la punta del flap, este crecimiento da cuenta de un fenómeno esperable, ya que la deflexión del flap produce desprendimiento del flujo, generando mayores fluctuaciones en la señal. A su vez las frecuencias son superiores hacia las puntas, debidas a los efectos de punta en el flujo. Es claro que las tomas que no presentaban detección eran aquellas que, para la condición de rotación de la hélice, son las más influenciadas por el paso de la pala correspondiéndose con la modulación observada en la señal (ver Figura 4). Por otro lado, también, los análisis en frecuencia realizados muestran para las tomas en cuestión los efectos del paso de la hélice ya que se detecta la frecuencia del paso de la pala, claramente (200 Hz. aproximadamente para las 6000 RPM, ver Figura 5), y siendo mayor la energía en juego para dichas tomas, incrementándose para las tomas más cercanas a la pala.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos nos demuestran las capacidades de la metodología de punto de cambio para la detección de variaciones en la señal que pueden identificar aspectos importantes del comportamiento del campo del flujo en el entorno del flap, en el caso expuesto se deben a los desprendimientos del flujo por la deflexión del mismo. Estos efectos fluidodinámicos se asocian a efectos inerciales y estructurales que en combinación pueden provocar interacciones de tipo aeroelásticas, las cuales pueden ser importantes a la hora de analizar la implementación del dispositivo en dicha configuración.

En particular el tema de que estos algoritmos no presentan detección de valores en algunos casos está en evaluación, puesto que particularmente no se produce detección en las condiciones y tomas en las cuales la señal sensada presenta una fluctuación y



modulación particular, en este caso generada por el pasaje de la hélice en sus cercanías.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] T.L. Lai, Sequential Change-point Detection in Quality Control and Dynamical Systems, *Journal of the Royal Statistical Society. Series B - Methodological*, 57(4), (1995) 613-658.
- [2] J. Marañón Di Leo, M.V. Calandra, J.S. Delnero, Determinación de estructuras turbulentas mediante algoritmos numéricos, *Mecánica Computacional*, 30, (2011) 425-434.
- [3] J. Marañón Di Leo, M.V. Calandra, J.S. Delnero, Detección de eventos turbulentos mediante la aplicación de algoritmos de punto de cambio, *Mecánica Computacional*, Vol XXXII, (2013) 1297-1308.
- [4] J. Marañón Di Leo, M. V. Calandra y J. S. Delnero. "Algoritmos de punto de cambio para la detección de estructuras vorticosas en campos fluidodinámicos turbulentos". *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. Editorial Elsevier - ISSN 0213-1315 (En Prensa) - (2016).
- [5] N. Savloff, J. M. Trochez Segura, S. Algozino, J. Marañón Di Leo. "Efectos aerodinámicos de hélices pusher sobre la configuración aerodinámica de un flap en condiciones de bajo Reynolds" Terceras Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería 20, 21 y 22 de abril de 2015. ISBN 978-950-34-1189-
- [6] S. Algozino; J. Marañón Di Leo; J. S. Delnero; I. Echapresto Garay. "Aerodynamic Study of a Pusher-Propeller effects on a simple flap" 34th AIAA Applied Aerodynamics Conference, AIAA Aviation and Aeronautics Forum and Exposition 2016. 13-17 June 2016. Washington D.C., EE UU.
- [7] N. Savloff. "Estudio experimental de la interferencia aerodinámica producida en un flap por una hélice en configuración pusher". Trabajo Final de Carrera de Ingeniería Aeronáutica. 2016.
- [8] G.J. Ross, Parametric and Nonparametric Sequential Change Detection in R: The cpm Package, *Journal of Statistical Software*, 66(3), (2015) 1-20.
- [9] G.J. Ross, N.M. Adams, Two nonparametric control charts for detecting arbitrary distribution changes, *Journal of Quality Technology*, 44(2), (2012) 102-116.

## SOBRE EL CONTROL DE FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS EXCITADOS PARAMÉTRICAMENTE

Silvana P. Flego

Área Departamental de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Nacional de La Plata (UNLP).  
(1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.  
[flego@fisica.unlp.edu.ar](mailto:flego@fisica.unlp.edu.ar)

Recientemente abordamos el estudio de los estados estacionarios en sistemas sometidos a excitación paramétrica mediante un tratamiento *ansatz* derivado desde el teorema del virial cuántico. En particular tratamos con las excitaciones provenientes de variar sinusoidalmente la capacitancia en un sistema oscilatorio eléctrico con un grado de libertad. Obtuvimos información sobre la amplitud estacionaria y sobre las condiciones para la aparición de los estados resonantes que nos permiten una interpretación más profunda del fenómeno y nos proporcionan nuevas herramientas de cálculos en aplicaciones prácticas. En esta comunicación mostramos como surge la condición de auto-consistencia y como la misma puede ser utilizada para determinar los parámetros de funcionamiento del circuito así como la información necesaria para llevarlo en forma controlada a un estado estacionario resonante.

*Palabras claves:* vibraciones paramétricas, oscilaciones eléctricas, *ansatz*, virial, Schrödinger.

### INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la excitación de oscilaciones por variaciones periódicas de los parámetros de un sistema oscilatorio [1-5] reviste de gran interés en todas las áreas de la ciencia y de la ingeniería. La ecuación de Mathieu (EM) es un excelente paradigma para el estudio de estas resonancias paramétricas, porque ejemplifica la respuesta de un sistema a perturbaciones periódicas forzadas encontradas en muchos sistemas naturales [1-13]. En cuanto a los aspectos teóricos, la literatura ya contiene la base necesaria para un análisis completo de la aparición de oscilaciones. Como es bien conocido, la cuestión conduce a la investigación de la llamada solución "inestable" de ecuaciones diferenciales parciales lineales con coeficientes periódicos, que desde el punto de vista matemático han sido estudiados en suficiente detalle [14-17]. Sin embargo, la teoría que aborda el problema lineal no proporciona información sobre la amplitud estacionaria, la estabilidad, la iniciación del proceso, etc. Tener información sobre la amplitud estacionaria es una cuestión no menos básica que el problema de la aparición de oscilaciones, ya que no sólo es importante para una descripción completa de todo el fenómeno, sino también para permitir cálculos en aplicaciones prácticas del mismo. Estudios en esta dirección han sido realizados [18-22], pero destaquemos que, cuando uno se enfrenta al estudio de un problema de estas características en el cual interviene una EM e intenta conocer la física contenida en las soluciones, uno se encuentra con una alta densidad de ecuaciones y un alto grado de sofisticaciones matemáticas que oscurecen la física contenida en el proceso. Por otra parte, destaquemos que el cálculo de las funciones de Mathieu y de sus valores propios todavía presenta algunas dificultades numéricas [23,24]. Recientemente abordamos el problema mediante un procedimiento que permite obtener *ansatz*, libres de parámetros de ajuste, para las autofunciones de la EM [25-27], y tales resultados los utilizamos para abordar el estudio de los estados estacionarios en sistemas sometidos a excitación paramétrica [28,29]. En particular abordamos las excitaciones provenientes de variar sinusoidalmente la capacitancia en un sistema oscilatorio eléctrico con un grado de libertad [28], estudiadas originalmente por Mandelstain en 1934 [13], y obtuvimos información sobre la amplitud estacionaria y sobre las condiciones para la aparición de los estados estacionarios resonantes [29]. Estos resultados permiten una interpretación más profunda del fenómeno y proporcionan nuevas herramientas de cálculos en aplicaciones prácticas. En esta comunicación mostramos como la condición de auto-consistencia obtenida en [28] y estudiada en [29] puede ser utilizada para determinar los parámetros de funcionamiento del circuito y como llevarlo en forma controlada a un estado resonante.

## PRELIMINARES

### Ansätze viriales para la ecuación de Schrödinger con potencial convexo simétrico

La ecuación de Schrödinger (SE) uni-dimensional, independiente del tiempo, en forma adimensional, es dada por [30]

$$\left[ -\frac{1}{2} \nabla_{\tau}^2 + U(\tau) \right] \psi_n(\tau) = E_n \psi_n(\tau), \quad \nabla_{\tau}^2 \equiv \frac{d^2}{d\tau^2} \quad (1)$$

donde  $U(\tau)$  es un potencial real independiente del tiempo.

Recientemente se introdujo en la literatura un procedimiento que permite, de manera simple y elegante, obtener expresiones ansatz, libres de parámetros, para las autofunciones de aquellas SE (1) cuyo potencial es convexo simétrico [25-26]. El procedimiento consiste en obtener un núcleo ansatz  $\chi_o(\tau)$ , solución de una relación local inferida desde el teorema del virial, a partir de la expresión

$$\chi_o(\tau) = \begin{cases} N \exp\left(-\int \sqrt{(\tau-\xi) U'(\tau)} d\tau\right) & \text{for } \tau \geq \xi \\ N \exp\left(+\int \sqrt{(\tau-\xi) U'(\tau)} d\tau\right) & \text{for } \tau < \xi \end{cases}, \quad (2)$$

donde  $\xi$  es el punto en el cual el potencial presenta su mínimo y  $N$  es la constante de integración. Luego, es posible elegir un conjunto base y construir una secuencia de funciones ortonormales  $\{\varphi_n, n=0,1,2,\dots\}$  con función de peso  $\chi_o^2(\tau)$ . La forma explícita de la secuencia puede establecerse a partir del proceso de Gram-Schmidt, seguida por la condición de normalización. Luego, los ansätze para la SE (1) son dadas por

$$\psi_n^{\text{ansatz}}(\tau) \equiv \chi_n(\tau) = \varphi_n(\tau) \chi_o(\tau) \quad (3)$$

### Ansätze viriales para la ecuación de Mathieu

El procedimiento citado en la sección anterior fue aplicado también a potenciales periódicos [27]. En particular se abordó el estudio de la ecuación de Mathieu (EM) caracterizada por el potencial

$$U(\tau) = \beta^2 \cos 2\tau, \quad (4)$$

con condiciones de contorno homogéneas

$$\psi_n(0)\psi_n'(0) - \psi_n(\pi)\psi_n'(\pi) = 0 \quad (5)$$

El núcleo de la EM, aproximando el potencial con un polinomio de sexto orden en  $\tau$ , es dado por [27]

$$\chi_o(\tau) = N \exp\{-\beta g(\tau)\}, \quad 0 \leq \tau \leq \pi \quad (6)$$

con

$$g(\tau) = -\frac{\sqrt{30}}{120} \left[ \left( 2(\tau-\xi)^2 - 5 \right) \sqrt{\left( 2(\tau-\xi)^2 - 5 \right)^2 + 5} + 5 \operatorname{arcsch} \left( \frac{\sqrt{5}}{5} \left( 2(\tau-\xi)^2 - 5 \right) \right) \right], \quad \xi \equiv \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

Las autofunciones de los estados excitados fueron construidas a partir de un conjunto base trigonométrico  $\{1, \sin(nx), \cos(nx), \dots\}$  ( $n=0,1,2,\dots$ ) que da origen a una secuencia de polinomios trigonométricos bi-ortonormales con función de peso  $\chi_o^2(\tau)$ . Denotando la polinomial seno por  $\varphi_n^{\text{impar}}$  y la polinomial coseno por  $\varphi_n^{\text{par}}$ , la expresión ansatz para el estado  $n$  puede ser escrita como

$$\chi_n(\tau) = \left[ a_n \varphi_n^{\text{par}}(\tau) + b_n \varphi_n^{\text{impar}}(\tau) \right] \chi_o(\tau) \equiv a_n \chi_n^{\text{par}}(\tau) + b_n \chi_n^{\text{impar}}(\tau), \quad n=1,2,\dots \quad (8)$$

donde las constantes  $a_n$  y  $b_n$  se determinan pidiendo que se satisfagan la condición de contorno y la de normalización.

## CIRCUITO RLC SOMETIDO A EXCITACIÓN PARAMÉTRICA

Consideremos un circuito RLC sin fuente electromotriz. Supongamos que en algún instante inicial,  $t_o = 0$ , el capacitor tiene una carga  $Q_o$  y la corriente en el circuito es nula,

$$q(0) = Q_o, \quad i(0) = 0 \quad (9)$$

Supongamos que de alguna manera, la capacidad varía de acuerdo con la ley:

$$C = C_o (1 + m \cos \omega t)^{-1} \quad (10)$$

La ecuación del circuito es dada por

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} q = 0 \quad \text{con} \quad i = \frac{dq}{dt} \equiv \dot{q} \quad (11)$$

teniendo en cuenta (10), la ecuación (11) puede ser escrita como

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\delta \frac{dq}{dt} + \omega_o^2 (1 + m \cos \omega t) q = 0 \quad (12)$$

donde

$$\delta = \frac{R}{2L}, \quad \omega_o^2 = \frac{1}{LC_o} \quad (13)$$

Proponiendo como solución de (12)

$$q(t) = y(t) \exp(-\delta t) \quad (14)$$

se encuentra que  $y(t)$  debe satisfacer la siguiente ecuación,

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + [-\delta^2 + \omega_o^2 (1 + m \cos \omega t)] y = 0 \quad (15)$$

Haciendo el cambio de variables,

$$\tau = \frac{1}{2} \omega t \quad \rightarrow \quad y(t) = y\left(\frac{2\tau}{\omega}\right) \equiv \psi(\tau) \quad (16)$$

la ecuación (15) adquiere la forma

$$\frac{d^2 \psi}{d\tau^2} + 2[\lambda + \beta^2 \cos 2\tau] \psi = 0 \quad (17)$$

donde

$$\lambda = \frac{\beta^2}{m} - \frac{z^2}{2}, \quad \beta^2 = 2 \frac{\omega_o^2}{\omega^2} m, \quad z = \frac{2\delta}{\omega} \quad (18)$$

y la carga (14) será dada por

$$q(t) = q\left(\frac{2\tau}{\omega}\right) \equiv \tilde{q}(\tau) \quad \text{donde} \quad \tilde{q}(\tau) = \psi(\tau) \exp(-z\tau) \quad (19)$$

### Tratamiento-ansatz del régimen estacionario

Recientemente fue abordado el circuito RLC cuando trabaja en estado estacionario [28] utilizando los ansätze (8) para la EM obtenidos en [27]. Es decir, fueron obtenidos ansätze para las autofunciones de carga  $q_n$  y de corriente  $i_n$  que satisfacen la condición de contorno

$$i_n(0) = i_n(2\pi / \omega) = 0 \quad (20)$$

Observe que, esta condición garantiza la condición inicial (9) y considera que luego de un período  $T = 2\pi / \omega$  la corriente regresa a su estado inicial. Las autofunciones de carga y de corriente son dadas por [28],

$$\tilde{q}_n(\tau) = Q_n \chi_n(\tau) \exp(-z_n \tau), \quad (21)$$

$$\tilde{i}_n(\tau) = I_n [\chi'_n(\tau) - z_n \chi_n(\tau)] \exp(-z_n \tau), \quad (22)$$

donde  $\chi_n$  son los ansätze (8) para la EM (17) con las constantes  $a_n$  y  $b_n$  determinadas pidiendo que se satisfaga la condición de contorno (20) y la condición de normalización. Luego (8) adquiere la forma

$$\psi_n^{\text{ansatz}}(\tau) = \chi_n(\tau) = \frac{1}{\sqrt{\Sigma_n^2 + z_n^2}} \left[ \Sigma_n \chi_n^{\text{par}}(\tau) + z_n \chi_n^{\text{impar}}(\tau) \right], \quad n = 1, 2, \dots \quad (23)$$

donde

$$\Sigma_n = \frac{1}{\chi_n^{\text{par}}} \frac{d}{d\tau} \chi_n^{\text{impar}} \Big|_{\tau=0} \quad (24)$$

Para que la teoría sea auto-consistente, se necesita determinar  $z_n = z_n(\lambda_n)$ . De (18) se tiene

$$\lambda_n = \frac{\beta^2}{m} - \frac{1}{2} z_n^2, \quad (25)$$

Los autovalores  $\lambda_n$  de la EM (17) pueden ser aproximados utilizando los ansätze (23) [30]

$$\lambda_n = \int_0^\pi \chi_n(\tau) H \chi_n(\tau) d\tau = \frac{1}{\Sigma_n^2 + z_n^2} \int_0^\pi \left[ \Sigma_n \chi_n^{\text{par}} + z_n \chi_n^{\text{impar}} \right] \left[ \Sigma_n H \chi_n^{\text{par}} + z_n H \chi_n^{\text{impar}} \right], \quad (26)$$

Definiendo los autovalores asociados a las autofunciones pares e impares por  $\lambda_n^{\text{par}}$  y  $\lambda_n^{\text{impar}}$ , y teniendo en cuenta la ortonormalidad de las funciones  $\chi_n^{\text{par}}$  y  $\chi_n^{\text{impar}}$ , es simple mostrar que

$$\lambda_n = \frac{1}{\Sigma_n^2 + z_n^2} \left[ \Sigma_n^2 \lambda_n^{\text{par}} + z_n^2 \lambda_n^{\text{impar}} \right] \quad (27)$$

De las expresiones (25) y (27) se obtiene

$$z_n = \pm \sqrt{\Lambda_n \pm \sqrt{\Delta_n}} \quad (28)$$

$$\text{donde: } \Lambda_n = \frac{\beta^2}{m} - \lambda_n^{\text{impar}} - \frac{1}{2} \Sigma_n^2, \quad \Upsilon_n = 2 \Sigma_n^2 \left( \frac{\beta^2}{m} - \lambda_n^{\text{par}} \right), \quad \Delta_n = \Lambda_n^2 + \Upsilon_n \quad (29)$$

Teniendo en cuenta (18) debemos tener  $z_n \in \mathbb{R}^+$ . Luego, existe el estado estacionario  $\chi_n$  si se verifica la siguiente *condición de auto-consistencia*

$$z_n = \sqrt{\Lambda_n \pm \sqrt{\Delta_n}} \quad \text{con: } \Lambda_n \geq 0, \quad \Lambda_n \pm \sqrt{\Delta_n} \geq 0 \quad (30)$$

## ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE AUTO-CONSISTENCIA

Presentamos en esta sección los resultados obtenidos en [29] de un estudio analítico de la relación de auto-consistencia (30), los cuales son de relevante importancia para el control de funcionamiento de un circuito sometido a excitaciones paramétricas.

### Valores críticos de los parámetros

Observando que  $\lambda_n^{\text{par}}$ ,  $\lambda_n^{\text{impar}}$  y  $\Sigma_n$  dependen solo de  $\beta$ , se tiene  $\Lambda_n = \Lambda_n(\beta, m)$  y  $\Delta_n = \Delta_n(\beta, m)$ . Estamos interesados en el comportamiento del sistema cuando  $m \in (0, 1)$ , pues (10) nos dice que para  $m=0$  no tendríamos variación de capacidad y para  $m=1$  la capacidad se tornaría infinitamente grande cada vez que  $\cos(\omega t) = -1$ . Luego, estudiamos el comportamiento de las funciones

$$z_n = z_n(\beta, m) = \sqrt{\Lambda_n \pm \sqrt{\Delta_n}}, \quad \beta \geq 0, \quad 0 < m < 1, \quad n = 1, 2, \dots \quad (31.a)$$

$$\text{condicionadas por: } \Lambda_n \geq 0, \quad \Lambda_n \pm \sqrt{\Delta_n} \geq 0 \quad (31.b)$$

➤ Consideramos  $z_n = \sqrt{\Lambda_n + \sqrt{\Delta_n}}$ , (32)

★ Si  $\Lambda_n \leq 0$  el valor mínimo de  $z_n$  ocurre cuando  $Y_n = 0$ . Un análisis de (29) bajo esta condición, nos dice que,

Si  $\lambda_n^{par} \leq \lambda_n^{impar} + \frac{1}{2}\Sigma_n^2$  :  $z_n^{min} = z_n(\beta, m_c^{(n)}) = 0$ , donde  $m_c^{(n)} = \frac{\beta^2}{\lambda_n^{par}}$  (33.a)

★ Si  $\Lambda_n > 0$  el valor mínimo de  $z_n$  ocurre cuando  $\Delta_n = 0$ . Un análisis de (29) bajo esta condición, nos dice que,

Si  $\lambda_n^{par} > \lambda_n^{impar} + \frac{1}{2}\Sigma_n^2$  :  $z_n^{min} = z_n(\beta, m_c^{(n)}) = \sqrt{\frac{\beta^2}{m_c^{(n)}} - \lambda_n^{impar} - \frac{1}{2}\Sigma_n^2}$  (33.b)

donde :  $m_c^{(n)} = \frac{\beta^2}{\lambda_n^{impar} - \frac{1}{2}\Sigma_n^2 + \sqrt{2\Sigma_n^2(\lambda_n^{par} - \lambda_n^{impar})}}$

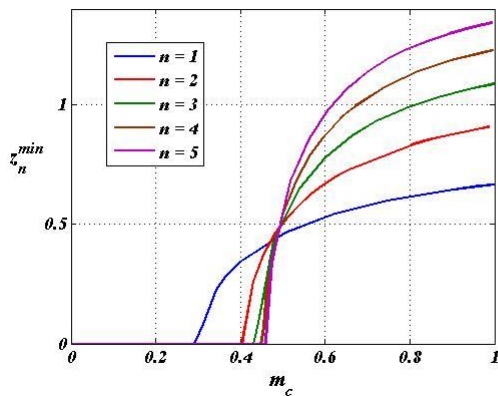
➤ Consideramos  $z_n = \sqrt{\Lambda_n - \sqrt{\Delta_n}}$ , (34)

★ Si  $\Lambda_n < 0$ ,  $z_n \notin \mathbb{R}$ . Luego el estado estacionario no existe.

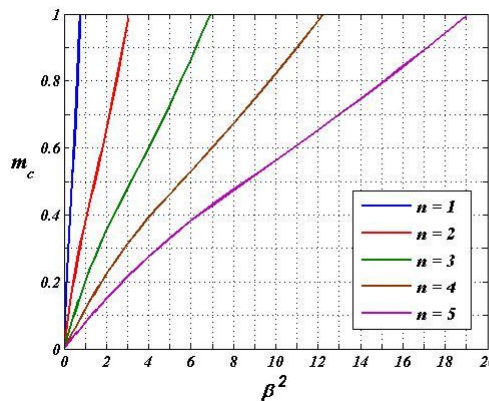
★ Si  $\Lambda_n \geq 0$ ,  $z_n \in \mathbb{R}$  si  $-\Lambda_n \leq Y_n \leq 0$ . Luego,  $z_n^{min}$  ocurre cuando  $Y_n = 0$  y es dado por (33.a).

En lo que sigue mostramos el comportamiento del sistema con  $z_n$  dada por (32). El lector interesado puede consultar [29] para un análisis más completo. En la figura 1 se muestran las curvas fronteras de las superficies (32) y en la figura 2 se representan tales superficies.

Fig.1: Curvas fronteras de las superficies de autoconsistencia

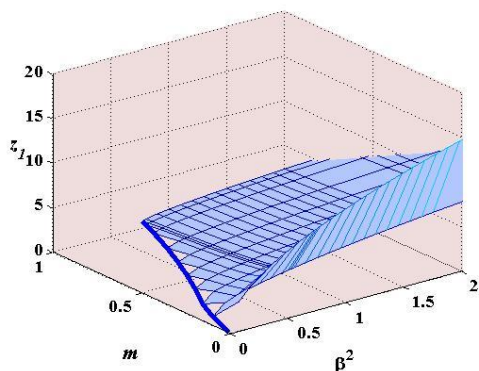


a) Grafica de  $z_n^{min} = z_n(\beta, m_c)$  con  $n = 1, 2, 3, 4, 5$ .

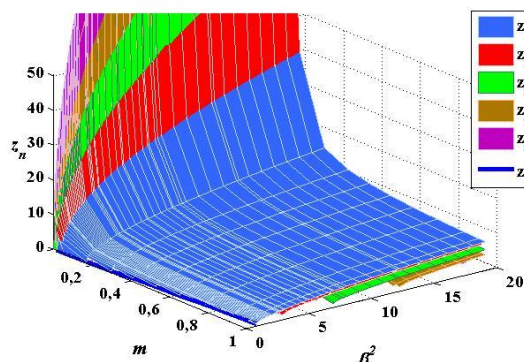


b) Proyección de  $z_n^{min} = z_n(\beta, m_c)$  en el plano " $\beta^2 m$ ".

Fig.2: Superficies de auto-consistencia



a) Grafica de  $z_1 = z_1(\beta, m)$



b) Grafica de  $z_n = z_n(\beta, m)$  con  $n = 1, 2, 3, 4, 5$ .



### Estudio de regiones estacionarias

Los autovalores de la EM son dados por (25) con  $z_n$  satisfaciendo (32)

$$\lambda_n = \lambda_n(\beta, m) = \frac{\beta^2}{m} - \frac{1}{2} [z_n(\beta, m)]^2, \quad (35)$$

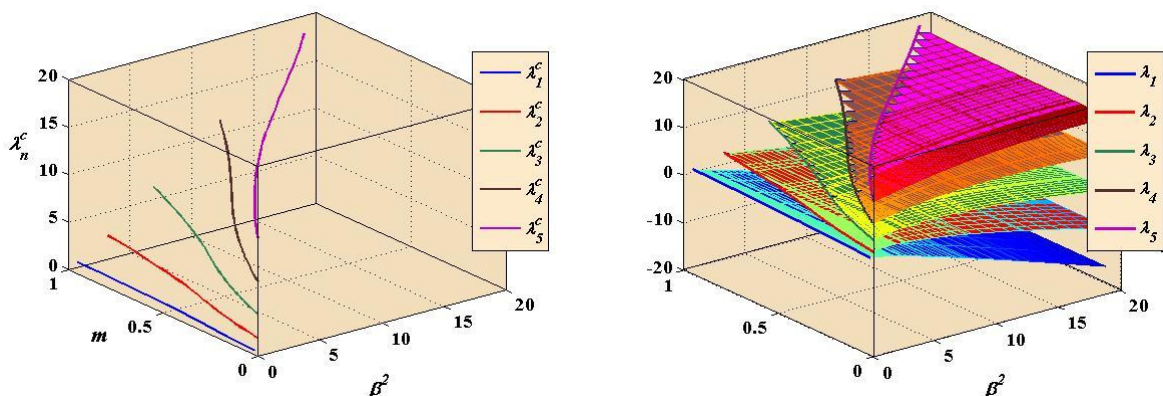
Luego, los parámetros críticos que conducen a los valores mínimos de  $z_n$  determinan los valores máximos de  $\lambda_n(\beta, m)$ . Teniendo en cuenta las expresiones (33) y (34) obtenemos

$$\text{Si } \lambda_n^{par} \leq \lambda_n^{impar} + \frac{1}{2} \Sigma_n^2 : \quad \lambda_n^c = \lambda_n(\beta, m_c^{(n)}) = \lambda_n^{par}(\beta) \quad (36)$$

$$\text{Si } \lambda_n^{par} > \lambda_n^{impar} + \frac{1}{2} \Sigma_n^2 : \quad \lambda_n^c = \lambda_n(\beta, m_c^{(n)}) = \lambda_n^{impar}(\beta) + \frac{1}{2} \sqrt{2 \Sigma_n^2 (\lambda_n^{par} - \lambda_n^{impar})} \quad (37)$$

En la figura 3 se representan las curvas para  $\lambda_n^c = (\beta, m_c^{(n)})$  y las superficies  $\lambda_n(\beta, m)$  para los estados  $n = 1, \dots, 5$ .

Fig.3: Superficies de auto-consistencia para  $\lambda_n = \lambda_n(\beta, m)$



a) Grafica de  $\lambda_n^c = \lambda_n(\beta, m_c^{(n)})$  con  $n = 1, 2, 3, 4, 5$ .

b) Grafica de  $\lambda_n = \lambda_n(\beta, m)$  con  $n = 1, 2, 3, 4, 5$ .

A partir de (27) podemos escribir

$$z_n^2 = -\Sigma_n^2 \frac{\lambda_n - \lambda_n^{par}}{\lambda_n - \lambda_n^{impar}} \quad (38)$$

Las propiedades de los autovalores de una ecuación de Sturm-Liouville, permiten afirmar que  $\lambda_n^{impar} < \lambda_n^{par}$ . Dado que  $z_n$  debe ser un número real positivo, (38) nos dice que

$$\lambda_n^{impar}(\beta) < \lambda_n(\beta, m) < \lambda_n^{par}(\beta) \quad (39)$$

Es decir, cada superficie de autoconsistencia para los autovalores  $\lambda_n(\beta, m)$  se encuentra entre dos superficies cilíndricas con generatrices paralelas al eje  $m$  y cuyas directrices son respectivamente, las curvas  $\lambda_n^{impar}(\beta)$  y  $\lambda_n^{par}(\beta)$ . En la figura 4 se muestran

las gráficas de las funciones (35) para  $m = 0.5$  y  $n = 1, 2, 3, 4, 5$ . Las líneas sólidas son las curvas intersección de las superficies graficadas en la figura 3.b con el plano  $m = 0.5$ . Las líneas de puntos son la intersección de los citados cilindros con dicho plano. Observe que cada curva  $\lambda_n(\beta, 0.5)$  está definida en  $[\beta_c^{(n)}, \infty)$  y  $\lambda_n^{max} = \lambda_n(\beta_c^{(n)}, 0.5)$ , donde  $\beta_c^{(n)}$  es el valor de  $\beta$  para el cual  $m_c^{(n)} = 0.5$ . Para valores de  $\beta < \beta_c^{(j)}$  solo podrán existir los estados estacionarios con  $n \leq j - 1$ . Observe además que los valores de  $\beta_c^{(n)}$  crecen con  $m$ .

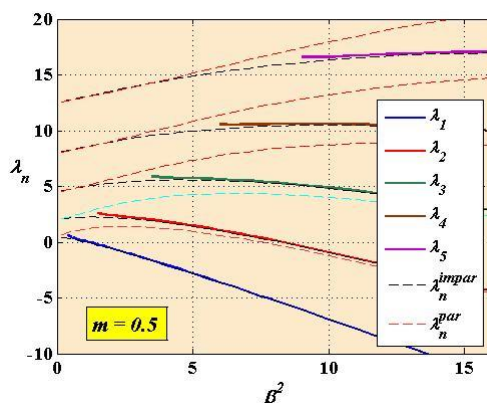
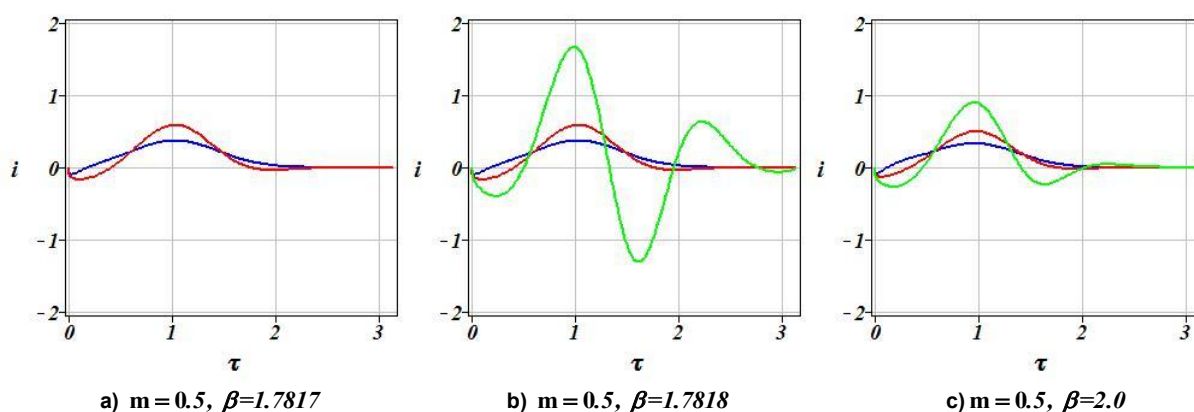


Fig.4: Curvas de autovalores para  $m = 0.5$

### Hacia las resonancias paramétricas

Los resultados anteriores nos conducen a preguntarnos que sucede cuando los parámetros son elegidos cercanos a los valores críticos del estado  $n$ . Un estudio de las autofunciones revela que la intensidad de la corriente crece notoriamente cuando nos acercamos a esos valores a partir de los cuales el estado deja de ser estacionario [28], lo cual sugiere que los parámetros críticos están íntimamente vinculados a las resonancias paramétricas. Estas características pueden observarse en la figura 5, la cual fue construida utilizando la expresión ansatz (23) con parámetros cercanos a los valores críticos correspondientes al estado  $n = 3$  ( $\beta_c^{(3)} \approx 1.7818$ ,  $m_c^{(3)} = 0.5$ ).

Fig.5: Ansätze para las autofunciones de corriente



### SOBRE EL CONTROL DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

Los resultados anteriores nos permiten seleccionar los parámetros para que el sistema trabaje en el estado estacionario  $n$ . Teniendo en cuenta (13), (18) y (28) tenemos

$$R_n = L \omega z_n(\beta, m) = L \omega_o \sqrt{\frac{2m}{\beta^2}} z_n(\beta, m), \quad \text{con } \beta = \frac{\omega_o}{\omega} \sqrt{2m} \quad (40)$$

Dado que  $\beta = \beta(\omega_o, \omega, m)$  y  $\omega_o = \omega_o(L, C_o)$  se tiene que  $R_n = R_n(L, C_o, \omega, m)$ . Luego, (40) nos dice que podemos elegir el valor de la resistencia para que el sistema se encuentre en el estado estacionario  $n$ . Por otra parte, puede ajustarse la frecuencia de excitación y la resistencia de manera que el estado  $n$  esté próximo a la resonancia, es decir

$$\omega_n^{res} \approx \sqrt{\frac{2m_c^{(n)}}{[\beta_c^{(n)}]^2}} \omega_o, \quad R_n^{res} = L \omega_n^{res} z_n(\beta_c^{(n)}, m_c^{(n)}) \quad (41)$$

En la figura 6 se muestran las curvas de resistencia para  $m = 0.5$  y  $n = 1, 2, 3, 4, 5$ . Como puede observarse, cada curva está definida en  $[\beta_c^{(n)}, \infty)$  y  $R_n^{min} = R_n(\beta_c^{(n)}, 0.5)$ , donde  $\beta_c^{(n)}$  es el valor de  $\beta$  para el cual  $m_c^{(n)} = 0.5$ . Para valores menores de  $m$ , las curvas se inician más cerca del eje  $\beta^2$ . Para  $m_c^{(n)} \leq m_*^{(1)}$  ( $m_*^{(1)} \approx 0.30694$ ) todas las curvas se inician en el eje  $\beta^2$ . Es decir, el estado estacionario resonante ocurre para  $R_n^{res} = 0$ .

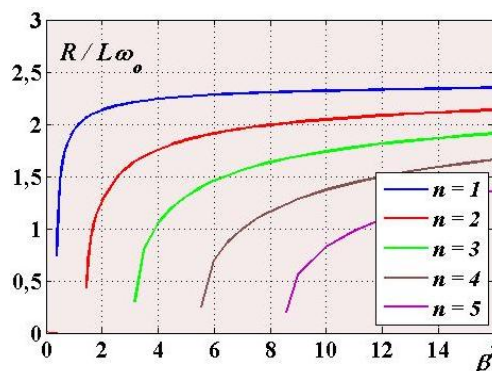


Fig.6: Curvas de resistencia para  $m = 0.5$

## CONCLUSIÓN

En esta comunicación mostramos los avances alcanzados en el estudio de los estados estacionarios de un circuito RLC sometido a excitaciones paramétricas. Presentamos un resumen de los principales resultados obtenidos en [29] donde se estudia el comportamiento del circuito a partir de la condición de auto-consistencia obtenida en [28] y observamos como tales resultados pueden ser utilizados para determinar de forma auto-consistente los parámetros de funcionamiento del sistema. Evidenciamos además, información teórica sobre el origen de las inestabilidades y como la misma puede ser utilizada para llevar al sistema, en forma controlada, a estados estacionarios resonantes. Tales resultados necesitan ser confrontados con resultados experimentales u obtenidos por simulación computacional a fin de evaluar la potencialidad del procedimiento. Estamos trabajando en esta línea.

Finalmente, destaquemos que el procedimiento seguido en esta comunicación puede ser aplicado a otros sistemas excitados paraméricamente siempre que los estados estacionarios estén gobernados por una ecuación tipo-Schrödinger con potencial convexo simétrico.

**Agradecimiento:** Este trabajo fue parcialmente soportado por el Proyecto "Investigación en el área de Ciencias Básicas-Convocatoria 2014-" de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Argentina.

## REFERENCIAS

1. J. Stoker: *Nonlinear vibrations in mechanical and electrical systems*. (New York, Inter. Publ.1950).
2. A.H.Nayfeh, D.T. Mook, *Nonlinear oscillations*. (New York, NY: Wiley Interscience, 1995.)
3. T. B. Benjamin, F. Ursell. Proc. R. Soc. A **224** (1954) 505–515. (doi:10.1098/rspa.1954.0218).
4. M. Faraday. Phil. Trans. R. Soc. Lond. **121** (1931) 299–340. (doi:10.1098/rstl.1831.0018)
5. R. Kelly. J. Fluid Mech. **27** (1967) 656–689. (doi:10.1017/S0022112067002538)
6. J. J. Binney, Mon. Not. R. Astron. Soc. **183** (1978) 779–797.
7. J. J. Binney, Mon. Not. R. Astron. Soc. **196** (1981) 455–467.
8. P. Sammarco, H.H. Tran, O. Gottlieb. J. Fluid Mech. **349** (1997) 327.
9. P. Hall, G. Seminara. J. Fluid Mech. **101** (1980) 423. (doi:10.1017/S0022112080001735)
10. G. Vittori. J. Hydraul. Eng. **124** (1998) 406. (doi:10.1061/(ASCE)0733-9429)
11. S. Fauve. *Pattern forming instabilities*. In *Hydrodynamics and nonlinear instabilities* (eds C. Godreèche & P. Manneville), (1998) 387. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
12. F.J. Poulin, G. R. Flierl. Proc.R. Soc. A **464** (2008)1885-1904 doi:10.1098/rspa.2008.0007.
13. L. Mandelstam, N. Papalexi: *Concerning the Basis of a Method for the Approximate Solution of Differential Equations*. Technical Physics in the USSR **1**, N° 4,(1934) 415.
14. H. Poincaré; *New Methods of Celestial Mechanics*. (Translated by D. Goroff, Amer. Inst. of Phys. 1993).
15. A. Liapounov: *The General Problem of Stability of Movement*, Charkow 1892, Annals of the Faculty of Sciences of Toulouse, 1907.
16. A. Andronov, A. Witt: *On the Mathematical Theory of Self-Excitation Systems with Two Degrees of Freedom*, Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki, **IV**, N° 1 (1934).
17. L. Mandelstam, N. Papalexi: *On Resonance Phenomena with Frequency Distribution*, Z.f. Phys. **72**, (1931) 223.
18. N. W. McLachlan, *Theory and Application of Mathieu Functions* (Oxford Press, London, 1951).
19. J. A. Stratton: *Electromagnetic Theory* (McGraw-Hill, New York, 1941), Chap. 6.
20. P. M. Morse and H. Feshbach: *Methods of Theoretical Physics* (McGraw-Hill, New York, 1953).
21. A. Erdélyi: *Bateman Manuscript Project on Higher Transcendental Functions* (McGraw-Hill, Malabar, FL, 1981), Chap. 16.
22. M. Abramowitz and I. Stegun: *Handbook of Mathematical Functions* (Dover, New York, 1964).
23. F. A. Alhargan: *Algorithm for the computation of all Mathieu functions of integer orders*, ACM Trans. Math. Softw. **26** (2001) 390.
24. D. Frenkel and R. Portugal: *Algebraic methods to compute Mathieu functions*, J. Phys. A **34**, (2001) 3541.
25. S. P. Flego. *Virial-ansatz treatment for time-independent symmetric convex potential*. Submitted.
26. S. P. Flego. *Virial-ansatz treatment for time-independent symmetric convex potential defined in finite intervals*. Submitted.
27. S. P. Flego. *Ansätze for the eigenfunction of the Mathieu Equation*. Submitted.
28. S. P. Flego. *Stationary ansatz-solutions of the RLC-circuit under parametric excitation*. To be submitted.
29. S. P. Flego. *Behavior of the stationary states of parametrically excited RLC circuits*. To be submitted.
30. W. Greiner and B. Müller, *Quantum mechanics. An Introduction*. (Springer, Berlin, 1988).

## **SOBRE EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CIRCUITO ELÉCTRICO PARAMÉTRICO**

Flego Silvana P. y Palacio Luis E.

Grupo de Investigación Teórica y Aplicada en Teoría de la Información (GTyATI).  
Área Departamental de Ciencias Básicas, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Nacional de La Plata (UNLP).  
1 y 47 s/n, (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.

**En la presente comunicación se presentan los resultados de un estudio de factibilidad y viabilidad de construir un circuito eléctrico RLC que permita la generación de oscilaciones paramétricas mediante una variación de capacidad. Los estudios se realizan bajo dos enfoques diferentes. Por un lado, se desea construir un circuito, simple y de bajo costo, para ser utilizado con fines didácticos. Por otro lado, se desea construir un dispositivo que cumpla con condiciones específicas de manera tal que permita evaluar la potencialidad de resultados analíticos recientemente introducidos en la literatura.**

Palabras claves: excitación paramétrica, circuito RLC oscilante, resonancia paramétrica.

### **INTRODUCCIÓN**

En 1860 Melde [1] demostró que, cambiando periódicamente la tensión de una cuerda, es posible excitar oscilaciones transversales en ella con frecuencias medias tan grandes como las debidas a cambios de las frecuencias de tensión. Así, las vibraciones paramétricas pueden describirse como sistemas dinámicos, en donde uno o más de los parámetros que definen al sistema son variables en el tiempo. En el caso más simple, la trayectoria teórica de fenómenos relacionados con la ocurrencia de tales oscilaciones conduce directamente a una ecuación diferencial con coeficientes periódicos. Ecuaciones de este tipo surgen en una gran cantidad de problemas físicos. Sus soluciones no serán exploradas aquí, sin embargo es importante mencionar que cuando la excitación externa es aproximadamente dos veces la frecuencia natural del sistema, estos se vuelven inestables y las oscilaciones incrementan en el tiempo. A esto se le conoce como resonancia paramétrica.

A principios del siglo pasado se inició el estudio de sistemas eléctricamente oscilante [2-8] y desde ese entonces los principios básicos para la realización observacional de un generador eléctrico paramétrico están disponibles en la literatura. Es nuestro interés construir un circuito eléctrico que pueda ser utilizado para visualizar como las vibraciones paramétricas pueden ser utilizadas para energizar un sistema y comprobar algunos resultados teóricos que describen el comportamiento del mismo cuando está sometido a estas excitaciones. Por otra parte, esperamos adquirir competencias que nos permitan construir dispositivos que puedan ser utilizados para evaluar predicciones teóricas existentes en la literatura.

En la presente comunicación se presentan los resultados de un estudio de factibilidad y viabilidad de construir un circuito eléctrico RLC que permita la generación de oscilaciones paramétricas mediante una variación de capacidad. Los estudios se realizan bajo dos enfoques diferentes. Por un lado, con el deseo de construir un resonador paramétrico cuyo comportamiento esté gobernado por una ecuación de Mathieu, presentamos un diseño de circuito RLC cuya implementación permitiría evaluar la potencialidad de resultados analíticos recientemente introducidos en la literatura [9-11]. Por otro lado, con fines didácticos, focalizamos nuestra atención en un circuito sencillo, diseñado con componentes modernos y de bajo costo [12] y reproducimos, mediante simulación computacional, resultados que están en concordancia con aquellos exis-

tentes en la literatura [8,12]. El mismo está en construcción y será utilizado para que el estudiante comprenda los conceptos subyacentes a este fenómeno, a través de un dispositivo funcional al servicio de la Facultad.

## ANTECEDENTES

Las excitaciones paramétricas de un sistema eléctrico fueron logradas por Mandelstam y Papalexi en el año 1933 [8]. El circuito estudiado es un RLC, sin ningún generador de fuerza electromotriz externo y con una capacidad que cambia periódicamente por accionamiento mecánico. El arreglo experimental que utilizaron se muestra esquemáticamente en la figura 1.

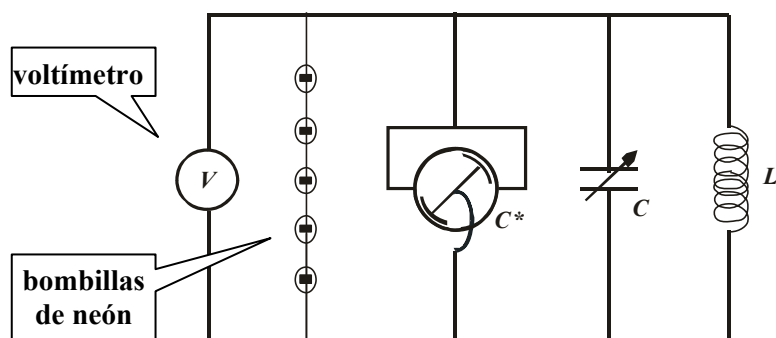


Figura 1: Esquema del circuito experimental utilizado por Mandelstam y Papalexi [6].

El sistema oscilatorio está formado por el capacitor  $C$  con capacidad cambiante periódicamente, el cual está en paralelo con un capacitor  $C^*$  lleno de aceite ajustable, y un inductor  $L$ , que consta de varias secciones de devanado secundario de un transformador (sin el núcleo de hierro). El capacitor  $C$  consta de dos sistemas de revestimiento: un estator y un rotor. El estator fue construido con 26 placas cuadradas de aluminio, cada una con 14 recortes radialmente simétricos; el rotor estaba formado por 25 discos circulares de 30 cm de diámetro, también hechos de aluminio con recortes similares (figura 2). La fuerza motriz para el sistema fue proporcionada por un motor de corriente continua que daba hasta 4000 rev/min. En régimen de funcionamiento, la velocidad del motor de  $n$  rev/seg cambia periódicamente la capacidad del sistema oscilatorio a una frecuencia igual a  $14n$  rev/seg. Las bombillas de neón, conectadas en paralelo con el capacitor, servían para determinar la aparición y la intensidad de las oscilaciones y, simultáneamente, para restringir la acumulación de oscilaciones en caso de que surgieran. El voltímetro electrostático utilizado era capaz de leer unos 1200 V.

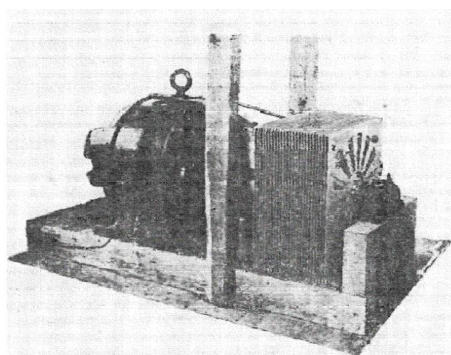


Figure 2: Fotografía del aparato experimental diseñado y utilizado por Mandelstam y Papalexi [8].

Los resultados experimentales obtenidos estuvieron en concordancia con las predicciones teóricas de la época. Los valores medidos resultaron bastante satisfactorios teniendo en cuenta que los experimentos fueron principalmente de naturaleza cualitativa.



El mecanismo físico de cómo operan los dispositivos variables constituye el principal problema para la construcción de un circuito que produce energía eléctrica a partir de la variación de parámetros. Desde los años 30 se vienen analizando distintas topologías de circuitos factibles de implementar, las cuales poseen diversas configuraciones. En los últimos años se ha considerado la utilización de dispositivos electrónicos. Una y otra vez, las implementaciones sirvieron para mostrar como adecuadas variaciones periódicas de la capacidad o de la inductancia del circuito generan energía eléctrica. Debido a nuestros actuales intereses, los circuitos reportados en [12] resultan prometedores para fines didácticos.

En [12] se estudió un circuito RLC paramétrico con dos capacitores que se conectan, alternativamente, en serie y en paralelo, dando por resultado una capacidad equivalente que varía periódicamente. Proponen luego, que la construcción puede realizarse con dos conmutadores direccionales o cuatro conmutadores unidireccionales. La capacidad real se determina a partir de los ciclos de la corriente y del voltaje en el solenoide siguiendo el siguiente algoritmo

$$C = \begin{cases} C_2 & \text{si } (U_L \geq 0, I \geq 0) \text{ o } (U_L \leq 0, I \leq 0) \\ C_1 & \text{en el resto de los casos} \end{cases}$$

donde  $C_1$  es el valor mayor de capacidad y  $C_2$  es el valor menor. El proceso propuesto constituye una operación controlada por fase sin una frecuencia externa predefinida. El circuito de conmutación de capacidades real se puede construir mediante el empleo de relés de estado sólido que contienen cada uno dos transistores de efecto de campo, conectados en oposición. Los relés se pueden controlar mediante un sistema de control basado en un micro-controlador.

Una segunda propuesta para la construcción de osciladores paramétricos reportada en [12] está basada en el empleo de diodos varicap ó varactor [9]. Un diodo consiste de dos regiones conductoras entre las cuales se desarrolla una capa no conductora cuando se aplica un voltaje en sentido inverso. Las regiones conductoras corresponden a las placas de un capacitor, en tanto que la capa no conductora corresponde al dieléctrico entre las placas. Mediante la aplicación de un voltaje variable se altera el espesor de la capa no conductora y, por lo tanto, la capacitancia del varactor varía, por ejemplo, de 70 pF a 1V hasta 3 pF a 28V.

## CONTRIBUCIÓN ACTUAL

Nuestro interés es construir un circuito eléctrico, a bajo costo, que pueda ser utilizado para visualizar como las vibraciones paramétricas pueden ser utilizadas para energizar un sistema y comprobar algunos resultados teóricos que describen el comportamiento del mismo cuando está sometido a estas excitaciones. Por otra parte, esperamos adquirir competencias que nos permitan construir circuitos que puedan ser utilizados para evaluar abordajes teóricos que están siendo desarrollados para estudiar el comportamiento de estos dispositivos. Actualmente disponemos de herramientas de control para tratar con sistemas descritos por una ecuación de Mathieu (ME) por lo que estamos interesados en circuitos cuyos componentes presenten un comportamiento lineal y los parámetros varíen de forma armónica. En particular, deseamos construir un circuito con capacidad variable, la cual provenga de una variación armónica de la distancia entre las placas del capacitor. Este sistema conduce, sin aproximaciones, a una EM. Con estos objetivos en la mira realizamos los siguientes análisis.

### Sobre la construcción del circuito RLC-serie original

Nuestras investigaciones iniciales estaban dirigidas a la factibilidad de construir un sistema oscilatorio reproduciendo el esquema experimental logrado originalmente por Mandelstam y Papalexi en el año 1933 [6-8]. Encontramos que la construcción y puesta en marcha de éste sistema presenta muchas desventajas, entre las cuales podemos citar:



- La capacidad  $C$ , variable periódicamente, tiene valores extremos fijos. Para el estudio del comportamiento del sistema, sería necesaria la construcción de varios capacitores, con un costo elevado para fines didácticos.
- La capacidad  $C^*$ , ajustable variando la constante dieléctrica (volumen variable de aceite entre las placas) resulta complicado.
- La inductancia  $L$  debe ser elevada, por lo que se debe utilizar un inductor voluminoso.
- La ecuación que describe el comportamiento del circuito no es una ME, pues la variación de la distancia entre las placas del capacitor responde a una función de onda cuadrada.

Destaquemos además que con los valores de los parámetros reportados en [8] se pueden lograr oscilaciones que producen sobretensiones elevadas, las cuales solo están limitadas por la conexión de lámparas de neón en serie ( $V \approx 600 - 700 \text{ volts}$ ). Desconectando las lámparas fueron reportados voltajes superiores ( $V \approx 2000 \text{ volts}$ ). Estos regímenes de funcionamiento requieren dispositivos más seguros y herramientas de control, a fin de que no representen un peligro de riesgo para la manipulación y experimentación con estudiantes.

Las dificultades descritas nos conducen a preguntarnos por circuitos construidos con componentes modernos que permitan visualizar el fenómeno y simulaciones computacionales que permitan su control.

### Sobre la construcción del circuito RLC-serie original con componentes modernos.

La primera propuesta fue utilizar el circuito utilizado por Mandelstam y Papalexí con componentes circuitales modernos. En este caso, la utilización de un capacitor variable de vacío sería el elemento principal a ser adquirido. Por ejemplo el capacitor CVCD 3000 de Jennings [13]. En la figura 3 se muestra este dispositivo y en la figura 4 el conjunto completo de capacitor, soporte y motor (el conjunto se vende comercialmente).



Figura 3: Capacitor variable de vacío CVCD 3000 (Jenning Technology).



Figura 4: Conjunto capacitor, soporte y motor.

No obstante, nos encontramos que el costo de ellos es muy elevado. Por otra parte, el motor proporcionado es de tipo paso a paso (permite saltos fijos o múltiplos de ellos) por lo que produce una variación de la distancia entre las placas del capacitor que responde a una función de onda cuadrada y por lo tanto un RLC paramétrico que se construya con este capacitor no es gobernado por una EM.

### AVANCES EN EL DISEÑO DE UN CIRCUITO CON FINES CIENTÍFICOS

Es nuestro deseo investigar la potencialidad predictiva de las herramientas de control desarrolladas en [9-11]. Proyectamos construir un circuito LRC-simple para lo cual es necesario

- Construir un inductor que, trabajando en régimen lineal, nos proporcione valores elevados de inductancia  $L$ . La solución más económica resulta en utilizar el secundario de un trans-

formador grande con múltiples derivaciones para usar diferentes valores de  $L$ . Para evitar efectos no-lineales, el mismo debe tener núcleo de aire, por lo que para dar un valor de  $L$  elevado debemos disponer de un transformador muy voluminoso.

- Construir un capacitor de placas plano-paralelas, cuya capacidad varíe debido a la variación de la separación entre sus placas. Dicho movimiento debe responder a una función senoidal. Proyectamos acoplar un motor eléctrico a una de las placas del capacitor por medio de un mecanismo de transformación de movimiento circular a lineal (leva, cigueñal-biela,...) como muestra la figura 5.

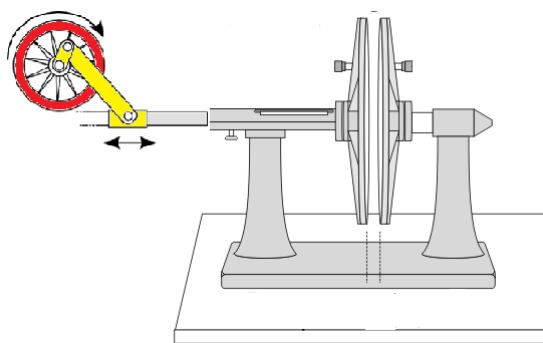


Figura 5: Esquema del capacitor con variación de capacidad debida al movimiento armónico de sus placas

Actualmente se están utilizando los resultados reportados en [10,11] para establecer los valores de los parámetros de funcionamiento de los distintos elementos del sistema a fin de poder evaluar si su construcción es viable.

## SOBRE EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO CON FINES DIDÁCTICOS

De los distintos circuitos investigados, decidimos iniciar las investigaciones del *circuito RLC simple de capacitores conmutados* citado en la sección anterior [12]. El mismo se puede construir con elementos de uso corriente, que pueden ser adquiridos comercialmente, y tiene la fundamental característica de estar construido con dispositivos eléctricos conocidos por *los alumnos de todas las áreas de la ingeniería*. Esta característica permite visualizar el fenómeno y comprobar algunos resultados cualitativos.

El esquema conceptual del circuito RLC-serie de capacitores conmutados se muestra en la figura 6. A fin de controlar el funcionamiento del mismo, optamos por someterlo a simulación computacional [15,16]. Los valores de los parámetros reportados en [12] nos resultaron insuficientes para reproducir los resultados allí obtenidos. Dada la similitud con el circuito original utilizado por Mandelstam y Papalexí (en ambos casos la capacidad varía respondiendo a una forma de onda cuadrada) utilizamos los valores reportados en el antiguo experimento [8]. Los resultados obtenidos están en concordancia con los citados en la literatura y resultan prometedores para controlar el sistema.

Actualmente estamos en la etapa de construcción del circuito real. Siguiendo [8] serán colocadas bombillas de neón, en paralelo con el capacitor, para determinar la aparición y la intensidad de las oscilaciones y, principalmente, para restringir la acumulación de oscilaciones en caso de que surjan.

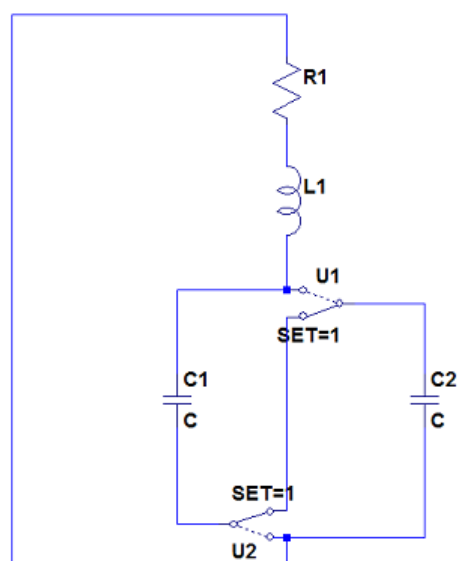


Figura 6. Esquema conceptual (realizado con LTSpice [15])

## CONCLUSIÓN

El circuito RLC con capacitores conmutados, sencillo y de bajo costo, resulta prometedor para ser implementado con fines didácticos. Constituye un sistema que ayuda a entender el fenómeno de las oscilaciones paramétricas eléctricas y por analogía, las que ocurren en fenómenos más complejos o de mayor dimensión, como puede ser el estudio de estructuras de edificios, alabes de helicóptero, sistemas sumergidos en fluidos turbulentos, flechas con rigidez periódica, entre otros. Por otra parte, un laboratorio de circuitos eléctricos resonantes, incluyendo la observación y el ensayo con distintos circuitos, entre ellos un paramétrico, permitiría comprender los conceptos subyacentes a los distintos tipos de resonancia y al mismo tiempo conocer técnicas modernas de análisis e implementación, como es la simulación computacional.

Por otra parte, la construcción de un circuito RLC paramétrico, cuyo comportamiento sea gobernado por una ecuación de Mathieu, tiene un costo elevado. Los avances teóricos, aplicables a todo sistema sometido a excitaciones paramétricas cuyo comportamiento esté gobernado por una ecuación de Mathieu, justifican esta inversión. Sin embargo, es necesario continuar los ensayos a fin de determinar los rangos de funcionamiento de los distintos componentes con el objetivo de que el sistema pueda ser llevado, en forma controlada, a distintos estados resonantes, permitiendo de esta manera, evaluar las predicciones teóricas y la potencialidad de las técnicas de control que están siendo desarrolladas. Estamos trabajando en esta línea.

**Agradecimiento:** Esta iniciativa está siendo parcialmente soportada por el Proyecto "Investigación en el área de Ciencias Básicas-Convocatoria 2014-" de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Argentina.

## REFERENCIAS

1. Melde, Pogg. Annalen der Phys. **109** (1859), 192; **111** (1860), 573.
2. Rayleigh, Phil. Mag., April 1883, p. 229;
3. H. Poincare L'eclairage électrique, 50 (1907), p. 299.
4. H. Guenther-Winter, Zeit. für Hochfreq **37**, (1931), 172.
5. Y. Watannabe, T. Saito y Y. Kaito, J. Inst. of Electrical Engineering of Japan, **53**, N 536, (1933), 21.
6. L.I. Mandelstam, Progress in the Physical Sciences, **13**, Issue 2, p. 162.
7. N.D. Papaleski, Oscillations Conference, November 1931.
8. L. I. Mandelstam and N. D. Papalexii, Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki, **3**, N 7 (1933), 1141. Translated into english by P. J. Pesavento, Journal of Technical Physics **3**, issue 7 (2006).
9. S.P.Flego. *Stationary ansatz-solutions of the RLC-circuit under parametric excitation*. To be submitted
10. S.P.Flego. *Behavior of the stationary states of parametrically excited RLC circuits*. To be submitted.
11. S.P.Flego. *Sobre el control de funcionamiento de sistemas excitados paraméricamente*. (IV Jornadas ITE, Fac. de Ingenieria, UNLP, La Plata, Argentina, 2015). ISBN 978-950-34-0946-6
12. F.D. Amador y H. Eckardt: *Simulation of a Parametric Oscillator Circuit, Part 2* (2013). <http://aias.us/documents/otherPapers/LCR-Resonant-2f.pdf>.
13. Jennings Technology. Vacuum capacitors. [http://www.iequalscdvdt.com/vacuum\\_capacitors.html](http://www.iequalscdvdt.com/vacuum_capacitors.html)
14. PSpice Links, PSpice 9.1. [http://www.eng.auburn.edu/%7Etroppel/pspice\\_links.html](http://www.eng.auburn.edu/%7Etroppel/pspice_links.html)
15. LTSpice circuit simulator, <http://www.linear.com/designtools/software/#LTSpice>
16. OpenModelica con interfase para graficador OMEdit, versión 1.9.0, <http://www.openmodelica.org/>.





CONSTRUCCIONES

## ANÁLISIS DE LA APARICIÓN DE FISURAS DE ORIGEN TÉRMICO EN ESTRUCTURAS MASIVAS DE HORMIGÓN CONSIDERANDO DISTRIBUCIÓN ALEATORIA DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL

Ma. Paula Zappitelli, Ma. Victoria Gutiérrez, Edgardo I. Villa y Claudio G. Rocco

Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.  
Calle 48 y 115 s/n, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, República Argentina.  
paula.zappitelli@ing.unlp.edu.ar

*Palabras clave: Estructuras de hormigón masivo, análisis termo-mecánico, XFEM, fisuras de origen térmico, modelo de fisuración cohesiva.*

### INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la definición del ACI, las estructuras de hormigón masivo son aquellas en las que el volumen de hormigón involucrado es lo suficientemente grande como para tomar medidas que permitan hacer frente al calor generado por la hidratación del cemento y a los cambios volumétricos asociados [1,2]. Estos cambios volumétricos generan la aparición de tensiones de tracción, que si superan la resistencia del material pueden ocasionar fisuras que afectan la capacidad resistente de la estructura y su durabilidad, o simplemente su funcionamiento y estética. Por este motivo es importante poder predecir la evolución térmica del hormigón durante el proceso de hormigonado y los niveles de tensiones generados por dichas temperaturas para poder tomar medidas tendientes a evitar los problemas referidos.

Si bien se han propuesto distintos modelos que permiten predecir la historia térmica en las estructuras de hormigón y establecer el estado tensional asociado, estos consideran un comportamiento elástico lineal que no permite describir el proceso de iniciación y propagación de fisuras, lo cual impide establecer niveles de tolerancia al daño o entender el comportamiento de estructuras fisuradas por causas térmicas. Por ello, incorporar el fenómeno de la iniciación y propagación de fisuras en los problemas térmicos de las estructuras de hormigón es un aporte significativo tanto en el campo teórico como práctico.

En este trabajo se presentan los resultados correspondientes al estudio de la localización y evolución de fisuras de origen térmico, utilizando el Método de los Elementos Finitos Extendido (XFEM), basado en el método de los segmentos cohesivos, con asignación aleatoria de las propiedades del material a través de un código desarrollado en MATLAB, considerando para la resistencia a tracción del hormigón una distribución normal y una distribución de Weibull.

### ECUACIONES DE BALANCE TÉRMICO

Las observaciones experimentales indican que el flujo de calor es proporcional al gradiente térmico, siendo el factor de proporcionalidad la conductividad térmica del material, como se indica en la expresión siguiente [3]:

$$\vec{q} = -K \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (1)$$

en la que  $q$  es el vector de flujo de calor,  $K$  la matriz de conductividad y  $\frac{\partial \theta}{\partial x}$  el vector gradiente de temperaturas. la ecuación (2) representa la formulación diferencial, o fuerte, de la ecuación de balance térmico:

$$\rho \cdot \dot{U} = -\frac{\partial q}{\partial x} + r \quad (2)$$



en donde  $q$  es el flujo de calor a través de la superficie de control,  $r$  es el calor generado en el volumen de control,  $\dot{U}$  es la variación temporal de la energía interna y  $\rho$  es la densidad del material. Para integrar numéricamente la expresión (2) se la debe relajar multiplicando cada miembro por una temperatura variacional arbitraria  $\delta\theta$ . Además para integrar numéricamente las ecuaciones diferenciales que describen el fenómeno físico hay que discretizar espacial y temporalmente el problema, llegando a la expresión (3)

$$\frac{1}{\Delta t} \int_V N^N \cdot \rho \cdot (\dot{U}_{t+\Delta t} - \dot{U}_t) dV + \int_V \bar{\theta}_{t+\Delta t}^M \cdot \int_V k_{t+\Delta t}^M \cdot \frac{\partial N^M}{\partial x} \cdot \frac{\partial N^N}{\partial x} \cdot dV - \int_V N^N \cdot r_{t+\Delta t} \cdot dV - \int_S N^N \cdot q_{t+\Delta t} \cdot dS = 0 \quad (3)$$

Este es un sistema de ecuaciones no lineal que se resuelve a través del Método de Newton modificado. Una vez obtenido el campo de temperaturas nodales, se puede obtener el campo de deformaciones del sólido a partir del coeficiente de expansión térmica del material. Las deformaciones elásticas se obtienen por diferencia entre las deformaciones totales y las deformaciones de origen térmico. Conocido el campo de deformaciones, las tensiones se calculan por aplicación de la Ley de Hooke.

### MODELO NUMÉRICO

El Método de los Elementos Finitos Extendido (XFEM) fue presentado primeramente por Belitschko y Black [4]. Es una extensión del Método de los Elementos Finitos basado en el concepto de partición de la unidad introducido por Melenk y Babuska [5], que permite incorporar funciones locales de enriquecimiento que permiten capturar las singularidades en la punta de la fisura, y una función discontinua que representa el salto en el desplazamiento a través de la superficie de la fisura. Considerando lo anterior el vector desplazamiento,  $\mathbf{u}$ , queda definido de la siguiente manera [5]:

$$\mathbf{u} = \sum_{I=1}^N N_I(x) [\mathbf{u}_I + H(x) \mathbf{a}_I] + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x) \mathbf{b}_I^{\alpha} \quad (4)$$

donde  $N_I(x)$  representa las funciones de forma,  $\mathbf{u}_I$  es el vector de desplazamientos nodales asociado con la parte continua de la solución de elementos finitos,  $\mathbf{a}_I$  es vector de grados de libertad nodales enriquecidos,  $H(x)$  es la función discontinuidad asociada a  $\mathbf{a}_I$  a través de la superficie de la fisura,  $\mathbf{b}_I^{\alpha}$  es el vector de grados de libertad nodales enriquecidos y  $F_{\alpha}(x)$  son las funciones elásticas de la punta de la fisura asociadas a  $\mathbf{b}_I^{\alpha}$ .

Una alternativa dentro del marco de XFEM está basada en el comportamiento cohesivo de tracción-separación. El código de elementos finitos ABAQUS V6.14 utiliza esta alternativa para simular la iniciación y propagación de fisuras a lo largo de un camino arbitrario dependiente de la solución en el cuerpo del material, ya que la propagación de la fisura no está atada a los límites del elemento determinados por la malla. Los nodos fantasma, superpuestos a los nodos reales originales, se introducen para representar la discontinuidad en los elementos fisurados [6], tal como se indica en la Fig. 1.

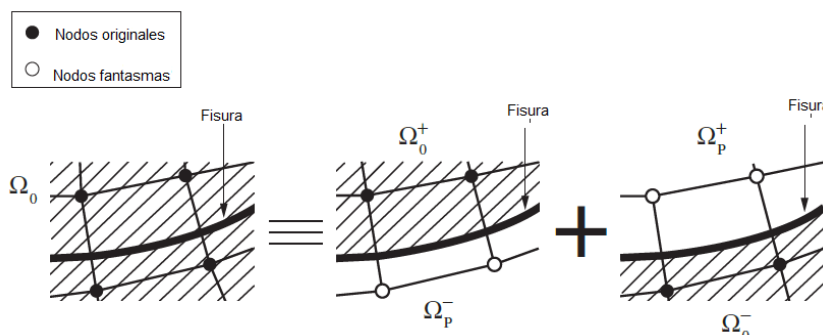


Figura 1. Principio del método de los nodos fantasma.



## CASOS ANALIZADOS

Se han analizado dos bases de hormigón de dimensiones 4mx2m y 8mx2m. El período de análisis es de 100 días, durante los cuales la única acción sobre la estructura es debida al calor de hidratación del cemento. Los fenómenos de transferencia de calor considerados incluyen convección entre la superficie de la base y el aire y conducción en la masa de hormigón. El modelo busca reproducir el fenómeno de fisuración a edad temprana en el hormigón utilizando XFEM basado en el método de los segmentos cohesivos, modelo que se encuentra implementado en el código de análisis por el MEF ABAQUS V6.14.

Para la resolución del problema se utilizó un modelo de análisis secuencialmente acoplado. Esto significa que el campo de tensiones depende del campo de temperaturas en el material, pero las temperaturas no dependen de las tensiones [3]. El modelo realizado es bidimensional. Se emplearon elementos lineales cuadriláteros de transferencia de calor de cuatro nodos (DC2D4) en el análisis térmico y elementos bilineales cuadriláteros de deformación plana e integración reducida de cuatro nodos (CPE4R) en el análisis mecánico. En la Tabla 1 se indican las propiedades térmicas y mecánicas del hormigón utilizado.

Tabla 1. Propiedades del hormigón

Propiedades	
Densidad	2.40E-06 kg/mm <sup>3</sup>
Conductividad	5.79E-07 kcal/mm.s.°C
Calor específico	2.30E-01 kcal/kg.°C
Coefficiente de convección hormigón-aire	1.6E-09 kcal/mm <sup>2</sup> .s.°C
contenido unitario de cemento	3.80E-07 kg/mm <sup>3</sup>
Resistencia media a la compresión a 28 días	38 MPa
Resistencia media a la tracción a 28 días	2.9 MPa
Módulo de elasticidad a 28 días	34000 MPa
Coefficiente de expansión térmica	1.19E-05 1/°C
Coefficiente de Poisson	2.00E-01 -
Peso e la unidad de volumen	2.40E-05 N/mm <sup>3</sup>
Apertura crítica	6.55E-02 mm

Como se explicó anteriormente el modelo mecánico empleado fue XFEM, basado en el método de los segmentos cohesivos. Este método requiere la definición de una curva de ablandamiento, que en el presente trabajo se adoptó de tipo lineal. Para definir la referida curva se necesitan: la resistencia a la tracción del material y la apertura crítica. En lo que respecta a la resistencia a tracción del hormigón se analizaron dos situaciones, en primer lugar se consideró que ésta varía según una ley de distribución normal como la indicada en la Fig. 2 (a), con una resistencia media de 2.9 MPa y una desviación estándar de 0.4 MPa. Por otro lado se consideró una distribución tipo Weibull, Fig. 2 (b), con parámetro de forma 18.81 y parámetro de escala 39.10 MPa

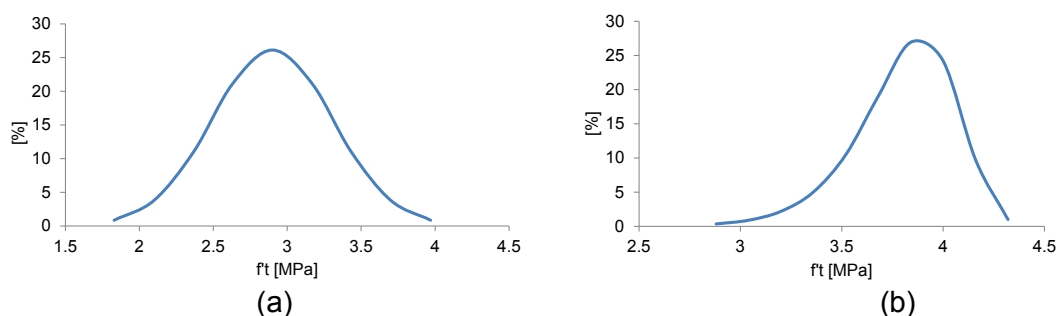


Figura 2. Resistencia a tracción del hormigón, (a) Distribución normal (b) Distribución de Weibull.

En el presente trabajo se consideraron las mencionadas distribuciones de resistencia a la tracción del material mediante el desarrollo de un algoritmo en MATLAB que permite asignar

aleatoriamente a distintas zonas de la estructura diferentes valores de la resistencia a tracción.

En la Fig. 3 se observa la discretización correspondiente a la base de 4mx2m en la que los distintos grupos de colores representan un valor de resistencia a tracción diferente.

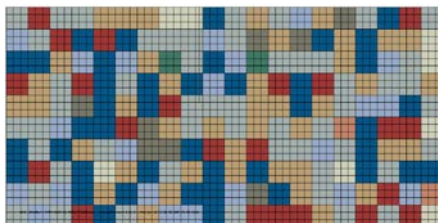


Figura 3. Asignación aleatoria del material en el elemento estructural.

Para cada uno de los casos analizados se consideraron cinco asignaciones aleatorias de resistencia a tracción, lo cual permite otorgarle un enfoque probabilístico al problema analizado. Con respecto a las condiciones de contorno en el modelo térmico se consideró intercambio de calor unidireccional entre la base de hormigón y el aire y condiciones adiabáticas en el resto de las caras. La temperatura ambiente se consideró igual 15° C, constante durante todo el análisis y la temperatura de colocación del hormigón se adoptó igual a 20° C.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figs. 5 a 7 se muestran los patrones de fisuración obtenidos para cada uno de los arreglos propuestos con las distintas distribuciones de resistencia estudiadas. A su vez, en las Tablas 3 a 5 se presentan los parámetros analizados: longitud de la fisura, relación entre la longitud de la fisura y el canto, tiempo de aparición de la fisura y coordenadas de la punta de la fisura, medidas como se indica en la Fig. 4.

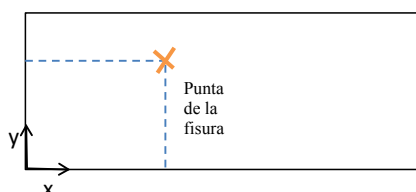


Figura 4. Coordenadas para la ubicación de la punta de la fisura.

A partir de la Fig. 5 y de la Tabla 3, puede concluirse que para las dos distribuciones la base se encuentra efectivamente fisurada, ya que la relación longitud de fisura/canto está en el orden del 40%, siendo la longitud de las fisuras y su posición similares. Las fisuras que discrepan con lo anterior son las correspondientes a los arreglos 1 para el caso de la distribución normal y 2 para el caso de la distribución de Weibull, lo que puede estar relacionado con el hecho que en esas zonas existan elementos de menor resistencia.

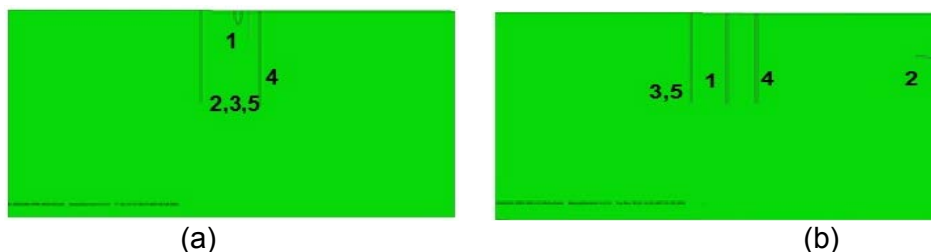


Figura 5. Patrones de fisuración en la base 4mx2m empotrada. El número de cada fisura corresponde al arreglo respectivo. (a) Distribución normal (b) Distribución de Weibull.

Con respecto al caso de las bases de 4mx2m, en la Fig. 6 se observa que todos los patrones de fisuración son verticales y se localizan en la zona inferior de la base para ambas distribuciones, a diferencia de lo que sucedía en el caso anterior.

Tabla 3. Parámetros analizados base 4mx2m empotrada.

Dimensiones de la base	Nº de arreglo	Coordenadas punta de la fisura				Longitud de fisura		Relación long fisura/Canto		Tiempo de aparición	
		[m]				[m]		[-]		[horas]	
		Normal		Weibull		Normal	Weibull	Normal	Weibull	Normal	Weibull
		x	y	x	y						
4X2	A1	2.00	1.73	2.00	1.13	0.27	0.87	13%	43%	18.00	17.01
	A2	1.73	1.13	3.73	1.60	0.87	0.27	43%	13%	16.78	4.06
	A3	1.73	1.13	1.73	1.13	0.87	0.87	43%	43%	16.01	14.02
	A4	2.20	1.13	2.20	1.13	0.87	0.87	43%	43%	18.04	18.04
	A5	1.73	1.13	1.73	1.20	0.87	0.80	43%	40%	16.78	15.54

Por otro lado, de acuerdo a lo indicado en la Tabla 4, la relación longitud de fisura/canto se encuentra en el orden del 20% para todos los casos, por lo que las bases están efectivamente fisuradas. Para ambas distribuciones las longitudes de fisuras obtenidas son iguales, pero la ubicación de la punta de la fisura discrepa para los arreglos 1 y 5.

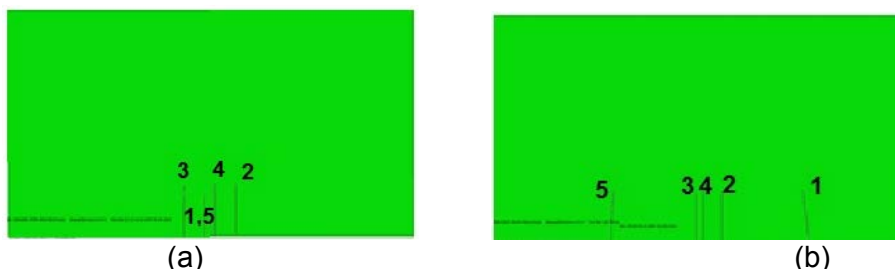


Figura 6. Patrones de fisuración en la base 4mx2m simplemente apoyada. El número de cada fisura corresponde al arreglo respectivo. (a) Distribución normal (b) Distribución de Weibull.

Tabla 4. Parámetros analizados base 4mx2m simplemente apoyada.

Dimensiones de la base	Nº de arreglo	Coordenadas punta de la fisura				Longitud de fisura		Relación long fisura/Canto		Tiempo de aparición	
		[m]				[m]		[-]		[horas]	
		Normal		Weibull		Normal	Weibull	Normal	Weibull	Normal	Weibull
		x	y	x	y						
4X2	A1	1.93	0.40	3.00	0.47	0.40	0.47	20%	23%	10.42	9.63
	A2	2.20	0.47	2.20	0.47	0.47	0.47	23%	23%	10.58	8.74
	A3	1.73	0.47	1.93	0.47	0.47	0.47	23%	23%	10.58	9.75
	A4	2.00	0.47	2.00	0.47	0.47	0.47	23%	23%	11.36	11.77
	A5	1.93	0.40	1.33	0.47	0.40	0.47	20%	23%	11.36	9.55

Finalmente, para el caso de las bases de 8mx2m empotradas, se observa en la Fig. 7 que los patrones de fisuración son similares para las dos distribuciones, al igual que la posición de la punta de la fisura, como se indica en la Tabla 5. La base se encuentra efectivamente fisurada, ya que la relación longitud de fisura/canto se encuentra en el orden del 30% para la mayoría de los casos y las longitudes de fisuras obtenidas son similares. El hecho de que la fisura correspondiente al arreglo 5 considerando distribución de Weibull sea horizontal puede estar relacionado con la presencia de una zona de baja resistencia en ese lugar.



Figura 7. Patrones de fisuración en la base 8mx2m empotrada. El número de cada fisura corresponde al arreglo respectivo. (a) Distribución normal (b) Distribución de Weibull.

En general, en todos los casos analizados, los patrones de fisuración obtenidos utilizando distribución normal y distribución de Weibull para la resistencia a la tracción son similares. Esto puede estar relacionado con que la diferencia entre la parte central de ambas distribuciones acumuladas es pequeña y difícil de detectar en histogramas experimentales. Sin embargo, para probabilidades extremadamente bajas, la diferencia entre el decaimiento exponencial de la distribución normal y la de Weibull, para la cual la cola sigue un decaimiento de acuerdo con una ley exponencial, es muy grande [7].

Esto es compatible con el hecho de que todos los casos analizados en este trabajo corresponden a tensiones de tracción cuya probabilidad de ocurrencia está ubicada en la parte central de las distribuciones.

Tabla 5. Parámetros analizados base 8mx2m empotrada.

Dimensiones de la base	Nº de arreglo	Coordenadas punta de la fisura				Longitud de fisura		Relación long fisura/Canto		Tiempo de aparición	
		[m]				[m]		[-]		[horas]	
		Normal		Weibull		Normal	Weibull	Normal	Weibull	Normal	Weibull
		x	y	x	y						
8x2	A1	6.87	1.33	1.40	1.40	0.67	0.60	33%	30%	14.78	14.39
	A2	1.07	1.33	6.73	1.73	0.67	0.87	33%	43%	15.50	14.42
	A3	0.93	1.33	0.93	1.33	0.67	0.67	33%	33%	14.28	12.43
	A4	6.87	1.33	1.07	1.33	0.67	0.67	33%	33%	14.78	15.50
	A5	1.20	1.40	1.07	1.33	0.60	0.67	30%	33%	16.06	15.50

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se incorporó exitosamente, a través de un código desarrollado en MATLAB, la resistencia a tracción del material según su distribución de probabilidad en un modelo XFEM basado en el método de los segmentos cohesivos para analizar patrones de fisuración. A su vez se utilizaron dos tipos de distribuciones diferentes, una distribución normal de probabilidades y una distribución de Weibull, para evaluar comparativamente los resultados obtenidos.

Los patrones obtenidos con ambas distribuciones son similares, lo cual se relaciona con el hecho de que las probabilidades consideradas se encuentran en la parte central de las curvas de distribución, y para estos valores ambas funciones se comportan de manera similar.

La incorporación al modelo de la resistencia a tracción según su distribución de probabilidad representa la implementación de una herramienta muy poderosa que permite introducir el análisis probabilístico en un análisis numérico.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ACI 116R-78, Cement and Concrete Terminology, Reported by ACI Committee 116, p. 27, 1978.
- [2] ACI 224R-01, Control of Cracking in Concrete Structures, Reported by ACI Committee 224, p. 28, 2001.
- [3] ABAQUS, Heat Transfer Theory Appendix I, Dassault Systems Simulia Corp., 2006.
- [4] Belytschko T., and T. Black, Elastic Crack Growth in Finite Elements with Minimal Remeshing, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 45, pp. 601–620, 1999.
- [5] Melenk, J., and I. Babuska, The Partition of Unity Finite Element Method: Basic Theory and Applications, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 39, pp. 289–314, 1996.

- [6] ABAQUS, ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.14, Dassault Systems Simulia Corp., Vol 2, pp 805-806, 2014.
- [7] Bazant Z., Pang S., Vorechovsky M. and Novák D., Energetic-statistical size effect simulated by SFEM with stratified sampling and crack band model. International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol 71, pp 1297-1320, 2007.



## DESARROLLO DE UN ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA APLICADO AL DISEÑO DE PARCHES DE MATERIAL COMPUESTO

H. Riojas-Roldán<sup>1</sup>, M. Braun<sup>1,2,\*</sup>, E.I. Villa<sup>1</sup> y C. Rocco<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 47 y 115 s/n, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, República Argentina

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigación Científicas y Técnicas (CONICET) CCT La Plata Calle 8 N° 1467, (B1904CMC), La Plata, Buenos Aires, Argentina

\* E-mail: matias.braun@ing.unlp.edu.ar

### 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, se ha invertido en la República Argentina mucho esfuerzo y dinero en la restauración y puesta en valor del sistema ferroviario nacional. Una de las principales tareas asociadas a dicho proyecto de rehabilitación es la reparación de los puentes metálicos que forman parte de dicha red. En este tipo de estructuras el deterioro puede ser debido a la corrosión, a los daños por impacto y/o a la formación de grietas por fatiga debido al aumento de la densidad del tráfico, al ataque del medio ambiente pero, fundamentalmente, a la falta de mantenimiento adecuado [1].

Tradicionalmente, la rehabilitación de las estructuras metálicas afectadas por alguna patología que pone en riesgo su vida en servicio se realiza empleando distintas técnicas de reparación, como soldadura, atornillado de parches o refuerzos de placas de acero [2]. No obstante, en las últimas décadas se ha extendido el uso de materiales compuestos para llevar a cabo reparaciones, adhiriéndolos al componente estructural dañado. Esto se debe a que este tipo de materiales presenta numerosas ventajas, que incluyen: baja densidad, mejora del comportamiento a fatiga, reducción de costos y una excelente capacidad para amoldarse a las superficies curvas e irregulares típicamente presentes en las estructuras [3-5]. Además, este tipo de reparaciones proporcionan una transferencia de carga más eficiente y uniforme en comparación con las reparaciones mecánicas, ya que reducen la concentración de tensiones [6,7].

El proceso típico de diseño de estos parches de material compuesto, en placas fisuradas, se realizan mediante procesos iterativos donde se adoptan arbitrariamente parches con distinta geometría y se verifica la estabilidad de la fisura en cada caso. Asimismo, existen estudios en los que se han analizado los parches más eficientes en casos sencillos, donde las placas a reparar son de espesor delgado y las fisuras son rectas. Sin embargo, este proceso de diseño no garantiza que la forma del parche sea la óptima, sino que permite establecer comparativamente la eficiencia de una configuración determinada en relación a otra [10].

En el presente trabajo se ha propuesto un algoritmo de optimización topológica aplicado a materiales ortótropos, implementado en el lenguaje de programación MatLab y el código comercial de Elementos Finitos (EF) Abaqus/Standard [11]. Para evaluar la capacidad del modelo se ha estudiado el caso de una placa de aluminio con una fisura inclinada, reparada con parches de material compuesto, colocados en ambas caras de la placa. Para evaluar la eficiencia de los parches, se ha calculado el Factor de Intensidad de Tensiones (FIT) en modo I y II, en el extremo de la fisura.

Los resultados obtenidos se han comparado con el estudio llevado a cabo por Ramji *et al.* [12]. Este análisis comparativo ha permitido evidenciar el potencial del algoritmo de optimización topológica desarrollado para ser aplicado al diseño eficiente de parches.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

### 2.1. Generalidades

El algoritmo de optimización topológica desarrollado en este trabajo se aplica al diseño de parches de material compuesto para la reparación de estructura. En este problema intervienen tres partes: la estructura a reparar, el material compuesto de refuerzo, y por último el adhesivo, que permite materializar la adherencia entre el parche y la estructura a reparar (ver Fig. 1).

El problema de optimización consiste en dimensionar la forma de dicho parche, garantizando la estabilidad de la fisura del elemento estructural. Para ello se considera que la geometría de la placa, y sus solicitaciones se encuentran fijas a lo largo del análisis, mientras que las superficies del adhesivo y del parche se reducen, manteniendo sus espesores constantes.

Es importante señalar que el modelo propuesto es válido para materiales presentan comportamiento elástico y lineal. Además, el parche de material compuesto debe ser unidireccional, y de pequeño espesor.

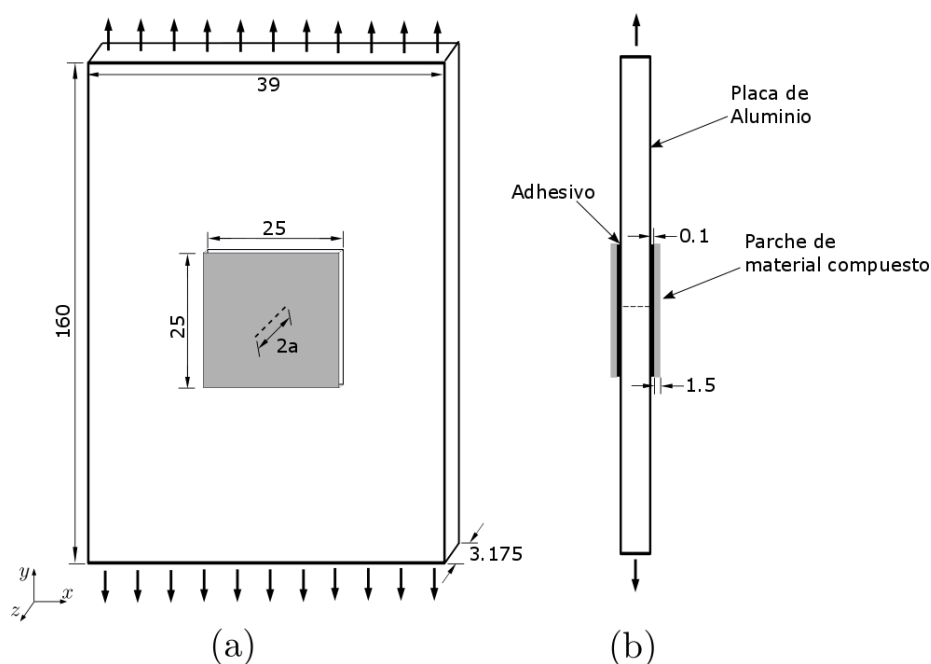


Figura 1. Geometría del modelo: (a) vista en perspectiva, (b) vista lateral. Todas las dimensiones en milímetros.

### 2.2. Descripción de Algoritmo de Optimización Topológica

El algoritmo de optimización topológica propuesto consiste básicamente en detectar y eliminar los elementos menos solicitados, de la malla de EF con la que es discretizado el parche.

Se parte de una geometría inicial de parche que es definida arbitrariamente, se calculan las tensiones mediante el código comercial de EF Abaqus/Standard, y a partir de un algoritmo desarrollado en MatLab se determinan los elementos menos solicitados. Estos elementos son eliminados, y se vuelven a calcular las solicitaciones para esta nueva configuración.

La cantidad de elementos eliminados en cada iteración es fijada al inicio del análisis, con el objetivo de no eliminar demasiados elementos, evitando que ocurra una variación excesiva de la distribución de tensiones de una iteración a otra. Pero también es necesario garantizar que el número de elementos a eliminar no sea extremadamente pequeño, ya que esto conduciría a un importante número de iteraciones, lo que se vería traducido en un elevado coste computacional.

Típicamente, en los modelos de optimización topológica se emplea como parámetro de sollicitación del elemento la tensión de Von Mises [11]. Debido a que este criterio no es aplicable a materiales ortótropos se ha propuesto determinar la sollicitación de los elementos que componen el parche mediante el criterio de rotura de Tsai-Hill.

En la Ec. (1) se muestra el criterio Tsai-Hill en su versión simplificada para dos dimensiones, en el que se considera que un punto determinado de la lámina ha fallado cuando  $l_f$  alcanza el valor de la unidad.

$$L_f = \left(\frac{\sigma_{11}}{X}\right)^2 - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{Y^2} + \left(\frac{\sigma_{22}}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 \quad (1)$$

donde  $X$  es la resistencia en la dirección de las fibras,  $Y$  la resistencia en la dirección perpendicular,  $S$  la resistencia a cortadura,  $\sigma_{11}$  la tensión en la dirección de las fibras,  $\sigma_{22}$  la tensión en la dirección perpendicular, y  $\sigma_{12}$  es la tensión de cortadura.

### 3. PROBLEMA DE VALIDACIÓN

#### 3.1. Condiciones de Contorno y Propiedades de los Materiales

En esta sección se ha descrito la geometría, las condiciones de contorno y las propiedades de los materiales del problema analizado, para validar el algoritmo propuesto. En la Fig. 1 se describe el caso estudiado, que consiste en un panel fisurado de aluminio tipo 2014 T6 sometida a una tensión de tracción de 121.11 MPa. Se trata de una placa rectangular de 160x39 mm<sup>2</sup>, y 3.175 mm de espesor que contiene una fisura  $2a$ , inclinada y centrada, de 10 mm de longitud. La inclinación de la fisura es de 45° con respecto a la horizontal, como se señala en la Fig. 1.

Propiedades	Materiales		
	Aluminio	Refuerzo Carbono/Epoxi	Adhesivo
$E/E_{11}$ - [GPa]	73.1	135	4.59
$E_{22}$ - [GPa]	-	9	-
$E_{33}$ - [GPa]	-	9	-
$\nu/\nu_{12}$	0.30	0.30	0.47
$\nu_{13}$	-	0.02	-
$\nu_{23}$	-	0.02	-
$G_{12}$ - [GPa]	-	8	-
$G_{13}$ - [GPa]	-	5	-
$G_{23}$ - [GPa]	-	5	-

Tabla 1: Propiedades mecánicas de los materiales considerados [13].

Los parches son de láminas unidireccionales de carbono/epoxi, de 0.375 mm de espesor. La dirección de las fibras coincide con la dirección de aplicación de las cargas. La adherencia entre la placa y el material compuesto se ha materializado mediante un adhesivo AV138/HV998.

Las propiedades empleadas para modelar el aluminio, el adhesivo y el parche han sido extraídas de la literatura [12]. En la Tabla 1 se muestran las propiedades mecánicas adoptadas para estos materiales, donde  $E$  es el módulo de Young,  $G$  el módulo de cortadura, y  $\nu$  el coeficiente de Poisson.

### 3.2. Descripción del modelo de EF

Todas las partes del modelo han sido discretizadas con elementos tridimensionales continuos de integración reducida de 8 nodos (C3D8R) [11]. Empleándose 123054, 26569 y 26569 elementos para discretizar la lámina, el adhesivo y el parche, respectivamente. Con el objetivo de reducir el costo computacional, se ha modelado la mitad del espesor de la placa, introduciendo la condición de simetría correspondiente en el plano interior de la misma.

Para modelar la interacción entre el material compuesto, el adhesivo y la placa de aluminio se han empleado contactos tipo *tie* [11], que permite considerar una adherencia perfecta de los materiales [8, 9, 12].

Se ha asumido que el frente de fisura es perpendicular al plano del panel, por lo tanto el Modo III del FIT ha sido despreciado. El FIT es deducido a partir de la Integral J utilizando la siguiente expresión:

$$J = \frac{K_I^2}{E'} + \frac{K_{II}^2}{E'} \quad (2)$$

donde  $E'$  es el módulo de elasticidad efectivo, que en condiciones de tensiones planas es igual al módulo de Young. La Integral J ha sido calculada considerando 8 contornos de integración para cada punto del extremo de fisura. El plano de cada contorno se ha definido en la dirección normal al frente de fisura.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para estimar la eficiencia de la forma del parche sobre paneles fisurados sometidos a modos mixtos, se suele emplear el parámetro  $R$  el cuál es definido de acuerdo a la siguiente expresión [12]:

$$R = \sqrt{\left(\frac{K_I - K_I^R}{K_I}\right)^2 + \left(\frac{K_{II} - K_{II}^R}{K_{II}}\right)^2} \quad (3)$$

donde  $K_I$  y  $K_{II}$  representan los valores del FIT de la placa sin reparar en modo I y II, respectivamente. Mientras que  $K_I^R$  y  $K_{II}^R$  representan el FIT en modo I y II de la placa reparada. Este parámetro  $R$  combina la reducción del FIT en modo I y II, lo que permite comparar la eficiencia de la forma del parche. Valores altos de  $R$  indican una mejor performance, con respecto a la reducción del FIT. En la comparación de resultados del FIT y  $R$ , se han considerado los valores correspondientes al plano medio de la placa.

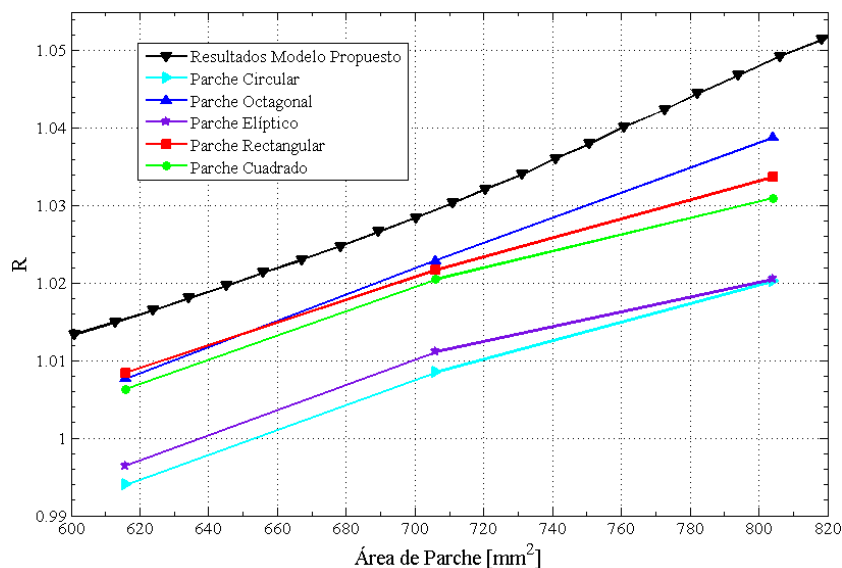


Figura 2. Variación del parámetro  $R$  en función del tamaño del parche.

En la Fig. 2 se muestran los valores del parámetro  $R$  en función del área del parche. Los resultados han sido comparados con datos presentados por Ramji *et al.* [12], para distintas geometrías de parches. En esta figura puede observarse que los resultados del algoritmo propuesto presentan la solución más eficiente, si tenemos en cuenta que para todos los tamaños de parche analizados se tiene un valor mayor del parámetro  $R$ .

En la Fig. 3 se pueden ver las geometrías de los parches obtenidas con el algoritmo propuesto, para tamaños de 616, 706 y 804 mm<sup>2</sup>. En esta figura se han señalado en rojo los elementos eliminados, representando en verde la geometría final del parche.

Como puede verse, para tamaño grandes de parche la geometría adopta una forma octagonal, lo que coincide con los resultados presentados por Ramji *et al.* [12], con la diferencia de que se obtiene otra proporción de lados, y por ello una solución más eficiente. Mientras que para tamaños más pequeños la forma más eficiente pasa a ser un hexágono, geometría no analizada en otros trabajos. Como puede verse, la forma más eficiente de parche cambia en función de las dimensiones del mismo, lo que tiene concordancia con los resultados presentados por otros autores [12]. También es importante señalar que las geometrías obtenidas no presentan huecos en su interior, ni formas irregulares, que podrían dar lugar a soluciones inválidas a fines prácticos.

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto un algoritmo de optimización topológica aplicado a materiales ortótropos, en particular para el diseño de parches de material compuesto.

Con el objetivo de validar el modelo propuesto se ha analizado el problema de una placa de aluminio sometida a tracción, con una fisura inclinada, reparada con parches de material compuesto. Los resultados han sido comparados con datos de la literatura, donde se ha podido observar que el algoritmo desarrollado permite obtener diseños de parches más eficientes.

Es importante destacar que las formas de parches obtenidas no presentan hueco, ni contornos irregulares, que podrían dar lugar a soluciones inválidas a fines prácticos. Los resultados dejan en evidencia el potencial de la herramienta numérica desarrollada, para el diseño de parches de material compuesto.

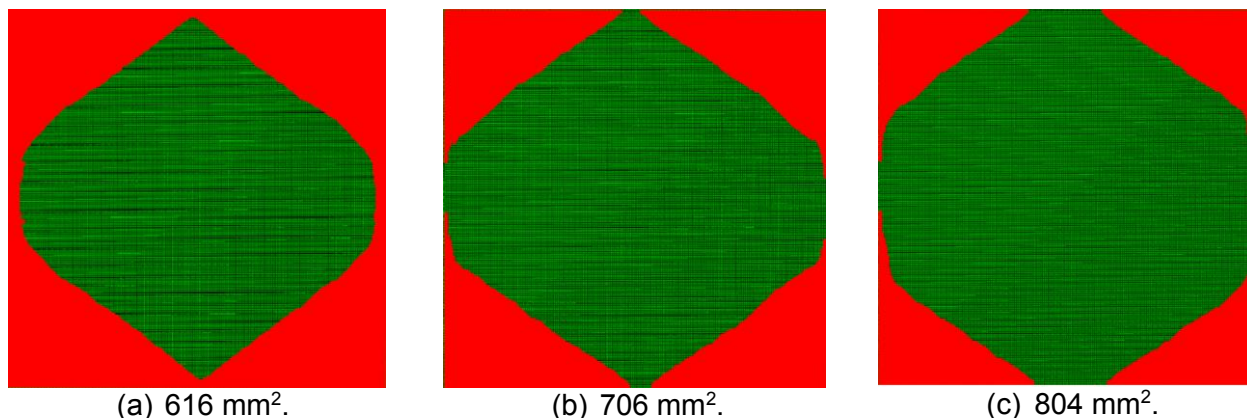


Figura 3. Geometrías de parches obtenidas con el algoritmo de optimización topológica.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Kamruzzaman, M.Z. Jumaat, N.H.R. Sulong, A.B.M.S. Islam. A review on strengthening steel beams using FRP under fatigue. *Sci. World J*; 1–21, 2014.
- [2] M. Gholami, A.R.M. Sam, J.M. Yatim, M.M. Tahir. A review of steel/CFRP strengthening systems focusing environmental performance. *Constr. Build. Mater*; 47:301–310, 2013.
- [3] V.M. Karbhari, F. Seible. Fiber reinforced composites – advanced materials for the renewal of civil infrastructure. *Appl. Compos. Mater*; 7:95–124, 2000.
- [4] A. Baker, R. Jones. Bonded repair of aircraft structures, Martinus Nijhoff Publishers, 1989.
- [5] A. Baker, R.J. Chester. Recent advances in bonded composite repair technology for metallic aircraft components. *Proc Int Conf Adv Comp Mat*; 45-49, 1993.
- [6] C.N. Duong, C.H. Wang. Composite Repair: Theory and Design. Elsevier Science Ltd, Oxford 2007.
- [7] S. Pantelakis, K.I. Tserpes. Adhesive bonding of composite aircraft structures: Challenges and recent developments. *Sci China-Phys Mech Astron*; 57: 2011, 2014.
- [8] B.A. Bachir Bouiadjra, M. Belhouari, B. Serier. Computation of the stress intensity factor for repaired cracks with bonded composite patch in mode I and mixed mode. *Compos Struct*; 56:401-406, 2002.
- [9] F. Benyahiaa, A. Albedaha, B.A. Bachir Bouiadjra. Elliptical and Circular Bonded Composite Repair under Mechanical and Thermal Loading in Aircraft Structures. *Mat Res*; 17: 1219-1225, 2014.
- [10] D. Ouinas, B.B. Bouiadjra, B. Serier, M. Said Bekkouche. Comparison of the effectiveness of boron/epoxy and graphite/epoxy patches for repaired cracks emanating from a semicircular notch edge. *Compos Struct*; 80:514-522, 2007.
- [11] ABAQUS, *User's Manual Version 6.13*, Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc, 2014.
- [12] M. Ramji, R. Srilakshmi, M. Bhanu Prakash. Towards optimization of patch shape on the performance of bonded composite repair using FEM. *Compos. Part B*; 45: 710-720, 2013.



## EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON MATERIAL RECICLADO COLOCADAS EN BASES DE ELEVADO ESPESOR Y EXIGIDAS A UN ALTO TRÁNSITO

Lisandro Daquerre<sup>(1)</sup>, Diego Larsen<sup>(1)</sup>, Eduardo Williams<sup>(1)</sup>, Elisa Frígoli<sup>(1)</sup>, Ernesto Mule<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> UIDIC -LaPIV. Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial. Fac. de Ingeniería U.N.L.P. La Plata – Argentina e-mail: lapiv@ing.unlp.edu.ar; daguerre@ing.unlp.edu.ar

<sup>(2)</sup> CEAMSE: Asistencia Técnica. Camino Parque del Buen Ayre, Argentina.

**Palabra clave:** Módulo Dinámico. Mezclas Asfálticas Densas. RAP. Viscosidad

### RESUMEN

La incorporación y desarrollo de nuevas tecnologías en los equipos de obra para su empleo en la colocación y compactación de mezclas asfálticas, ha posibilitado llevar a cabo las primeras experiencias en la Argentina con mezclas densas elaboradas en caliente con un 20% de material reciclado (RAP), y colocadas en una única pasada de 18cm, muy superiores a lo que recomienda la tradición.

En este sentido se reportan los resultados alcanzados luego de haber sido extendidas más de 60000 tn de mezcla asfáltica con RAP.

Se han efectuado estudios y ensayos en laboratorio y obra, mensurando por ejemplo la curva de enfriamiento del material distribuido, tanto superficialmente como en el fondo de la capa y la evolución del grado de compactación con las pasadas de los rodillos lisos oscilatorios.

Han sido extraídos testigos asfálticos para determinar las propiedades volumétricas y mecánicas Marshall, evaluando comparativamente el Stiffness del material en la parte superior con la inferior y a su vez recuperado el ligante asfáltico con la finalidad de conocer la respuesta viscoelásticas, a un año de la puesta en servicio.

Se puede aseverar como conclusión, que el comportamiento o servicio brindado por la calzada, al ser exigida por el tránsito pesado resultó ser sumamente satisfactorio, con lo cual cuando se efectúa un buen diseño y control de la puesta en obra, las tecnologías bien aplicadas pueden ser muy útiles para acortar por ejemplo plazos de obra generando ahorros para la comunidad.

### INTRODUCCIÓN- CONSIDERACIONES GENERALES

Con la presente comunicación y luego de haber transcurrido más de un año de la rehabilitación del Camino Parque del Buen Ayre, se reporta la evolución de determinados parámetros mecánicos y volumétricos que sirven como indicadores para evaluar cómo ha sido la respuesta del material colocado como Base Inferior asfáltica, al ser exigido por las cargas del tránsito durante este período.

La Autopista del Camino Parque del Buen Ayre inaugurada en 1982, se encuentra localizada a unos 25 km al norte de la ciudad de Buenos Aires. Vincula los accesos Norte y Oeste a dicha ciudad poseyendo una longitud aprox. de 22,6 km. Está conformada con tres carriles por lado, con banquetas sectorialmente pavimentadas y numerosos intercambiadores la cruzan a lo largo la traza. Transcurridos 30 años, entre mayo 2012 y dic 2015 se llevaron a cabo trabajos de rehabilitación para poder satisfacer la demanda de tránsito por los próximos 15 años. Esquemáticamente en la Figura 1, se presenta la estructura original y la final construida, sin incluir la banquina interna en el carril rápido:

CALZADA PRINCIPAL		ANCHO 10,50 m	
<u>CARRIL RAPIDO</u>		<u>CARRIL MEDIO - LENTO</u>	
EXISTENTE	CONSTRUIDO	EXISTENTE	CONSTRUIDO
Cota Proyecto + 10 cm		Cota Proyecto + 10 cm	
Cota actual +0,0		Cota actual +0,0	
6 cm, CAC (a fresar)	5 cm SMA 19mm	6 cm CAC (a fresar)	5 cm SMA 19mm
	9 cm, CAC D19 con AM3		9 cm, CAC D19 con AM3
16 cm Tosca Arena Asfalto	2 cm SAMI	16 cm Tosca Arena Asfalto (a fresar)	18 cm Base Granular c/ 20%RAP Clasific. CA 30 (3 capas de 6cm)
	16 cm Tosca Arena Asfalto		

Figura 1, Propuesta de Intervención

En síntesis, la estructura nueva, se conformó en los carriles medio y lento por una sub base granular asfáltica de 18 cm de espesor elaboradas con un cemento asfáltico CA30 y hasta con un 20% de material reciclado o RAP. La base superior de 9 cm de espesor, se integra con un Concreto Asfáltico en Caliente Denso (CACD19) ligado con un betún modificado con polímeros del tipo SBS. Finalmente la estructura de rodamiento se completa con una carpeta en 5cm de espesor con una mezcla del tipo Stone Mastic Asphalt (SMA) con tamaño máximo de 19 mm y ligante AM3.

### Operatoria, Proceso Constructivo

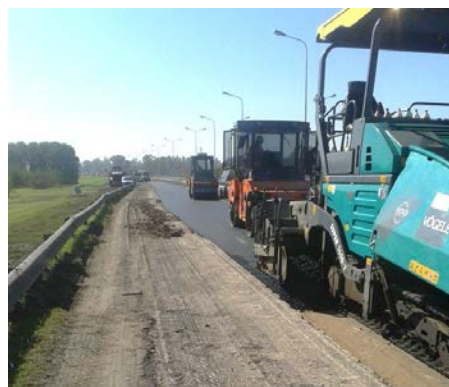
#### Intervención en Carril lento y medio - Base Asfáltica Inferior

Originalmente, la intervención sobre la primera base de 18cm, preveía que la misma fuera ejecutada en 3 capas de 6 cm de espesor. En una oportunidad se la colocó en una única capa de concreto asfáltico de 18 cm de espesor, -en coincidencia con el ingreso a un relleno sanitario-, dada la inestabilidad climática existente, que hacía imperioso producir el tapado o cobertura de la cancha abierta. Por ende la inspección tomó la decisión de hacer colocar la mezcla en una única pasada con la intención de provocar la habilitación en forma preventiva dado que la intención era posteriormente rehacer la misma. Se efectuaron ensayos exhaustivos y se evaluó su comportamiento durante un mes. Dada la respuesta satisfactoria frente al tránsito en el período analizado, es que se adoptó la decisión de continuar trabajando en elevados espesores pero con un seguimiento más intenso.

#### Proceso de elaboración, Puesta en Obra y Contralores in situ:

La usina asfáltica empleada para la elaboración de la mezcla asfáltica con Rap, fue una AMMANN discontinua con capacidad de 150tn/h, de la empresa COARCO. Se caracterizó, al asfalto del RAP empleado y al del material elaborado, midiendo la viscosidad a 60°C luego de efectuar recuperaciones controladas bajo la norma UNE 12697-3. Esto permitió que se incorpore hasta un 20% de Rap en la mezcla asfáltica, sin que se vean afectadas las propiedades viscoelástica, mecánicas y volumétricas de la mezcla asfáltica.

El traslado del material elaborado fue realizado en camiones con bateas que transportaban aprox. la carga neta con 30tn. La caja de los mismos estaba recubierta con una lona para limitar la posible oxidación del asfalto durante el transporte hasta el frente de obra.



Para la distribución se empleó una terminadora Vogele 1600-2, apoyada sobre orugas, lo cual facilitó la tracción sobre el terreno para colocar la mezcla en el espesor de 18cm. Dispone de tampers con vibración para alta compactación. El proceso de compactación se realizó con dos rodillos Wirtgen HD90 y HD110 con capacidad de oscilación. Estos poseen la particularidad de producir tanto en avance como en retroceso, fuerzas que se transmiten al terreno en forma de cizallamiento, brindando una energía adicional a la ejercida por el peso propio del rodillo, este proceso ha sido denominado compactación inteligente. [1].

El grado de compactación in situ fue constatado con un medidor nuclear Troxler 3440, siendo el mismo ajustado para hacer las lecturas por retrodispersión en 15 segundos. El solapamiento entre las pasadas del rodillo, hizo de las mediciones se hicieran sobre uno de los lados laterales.

En la Figura 2, se reflejan los resultados alcanzados, expresados tanto en grado de compactación como en reducción de vacíos con el número de pasadas del rodillo con la reducción de la temperatura de la mezcla asfáltica colocada.

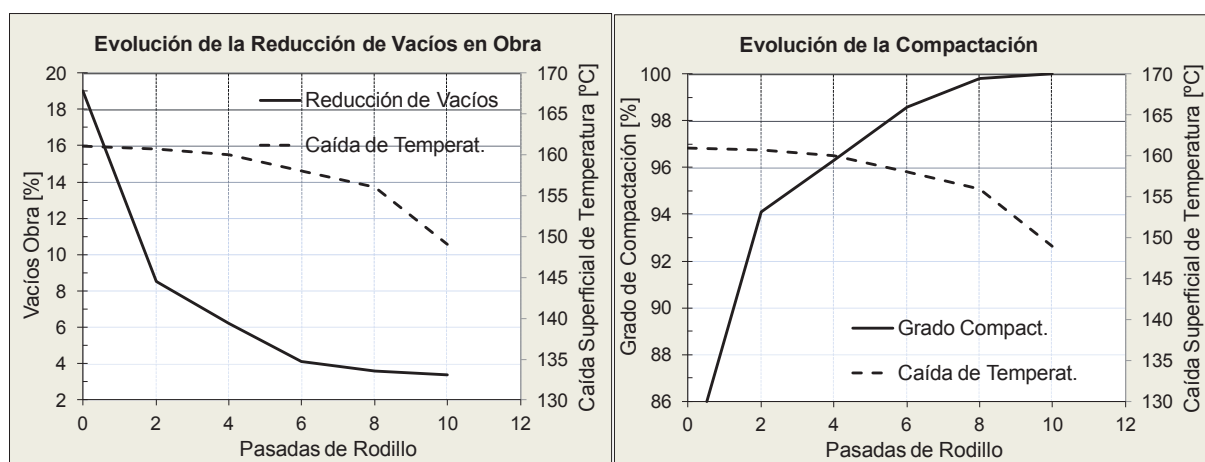


Figura 2

También se registró la temperatura sobre camión y a la salida de la terminadora, obteniéndose la curva de enfriamiento del material colocado a distintas profundidades, la cual fue contrastada con el programa de cálculo Multicool desarrollado en la Universidad de Minnesota, California [2].

Otro de los controles efectuados en obra, fue la medición superficial de la temperatura del material extendido y su variación térmica, con una cámara fotográfica termográfica. Como señala Jacinto García et al[3], estos gradientes pueden traer aparejados una serie de inconvenientes como es un mantenimiento anticipado por aparición de algún tipo de patología asociado a la segregación térmica.

### Control de recepción: Testigos, Vacíos, Módulo Dinámico, Viscosidad ligante Análisis e interpretación de resultados

Los métodos de control tradicionales para recepcionar los pavimentos asfálticos, están basados en alcanzar un determinado grado de compactación, relacionando la densidad aparente de las probetas asfálticas moldeadas en laboratorio con las obtenidas de los testigos extraídos de la cancha ya ejecutada. De esta manera se asegura que el material compactado garantice una determinada resistencia al corte durante su vida útil.



Figura 3

Al final de la obra el control de recepción

fue realizado calando testigos aleatoriamente, con una frecuencia de 1 por cada dos bateas que se colocaron. Se conformaron lotes limitados a la producción diaria evaluándose el espesor y los vacíos. Estos últimos fueron determinados en el espesor integral, y por capas, comparándose los registros alcanzados en la capa superior respecto de la inferior. Los valores obtenidos se encuadraron dentro de las tolerancias de diseño. Se detectó que la capa inferior alcanzó valores medios inferiores al 5% y en un 0.6% más alto al valor medio de la capa superior.

Un análisis de varianza ANOVA, fue empleado para constatar si el grado de compactación afectó significativamente los Vacíos, según la capa en que se encuentren ya sea en la zona superior o inferior. El análisis estadístico para un intervalo de confianza del 95%, arrojó que un solo lote -de 11- era significativa esta diferencia ( $F > F_{crit}$ ). De los testigos inferiores uno solo sobrepasa el 5% de vacíos (límite superior admisible para la recepción) siendo la diferencia entre extremos del 1,2%. [4]

A un año de la habilitación se extrajeron nuevos testigos y se obtuvieron los siguientes valores medios de vacíos,

Tabla 1

VACÍOS MEDIOS, TESTIGOS				
Lote Obra	Capa Superior		Capa Inferior	
	INICIAL	un año +	INICIAL	un año +
1614	3,8	2,8	4,1	3,5
1615	2,9	2,5	3,4	2,7
1612	3,5	2,8	4,8	3,2

Cada lote analizado contiene al menos 6 testigos, encontrándose al efectuar un análisis ANOVA de una variable, que no existen variaciones medias significativas entre los grupos tanto para capa superior e inferior, luego de haber transcurrido un año desde la puesta en servicio. Los vacíos medios se encuentran dentro del límite inferior admisible, pero aún el material compactado posee huecos suficientes para alojar el asfalto que eventualmente podría fluir con el paso del tránsito pesado.

Otra de las propiedades de las mezclas asfálticas que tiene influencia en la respuesta estructural de los pavimentos es el *Módulo Dinámico*. Sobre los testigos de 100mm de diámetro, extraídos luego de estar un año en servicio, se les determinó el Módulo Dinámico Resiliente por Compresión Diametral, según la norma UNE EN 12697- 26[5], aplicándole un tiempo de carga de 124 ms equivalente a 2hz.

En la Tabla 2, se reportan algunos de los valores medios del Módulo Dinámico Resiliente ( $E_{din}$ ) a 20°C obtenidos en cada lote y también se hace un análisis estadístico con los resultados de los testigos originales.

Tabla 2

LOTE	Edin Sup		Edin Inf		R <sup>2</sup>	Se/Sy	Criterio	ANOVA
	Promedio	ds St	Promedio	ds St				
1328	5500	619,1	5415	731,3	0,91	0,32	Excelente	No signif.
1351	5100	695,2	4507	1093,3	0,58	0,50	Adecuado/Bueno	No signif.
1371	3656	922,1	3113	729,1	0,83	0,38	Bueno/Bueno	No signif.
1372	4733	564,5	4417	422,7	0,22	0,83	Pobre/Pobre	No signif.
1374	4133	631,4	3950	609,1	0,72	0,37	Bueno/Bueno	No signif.
1375	3914	884,0	3757	741,3	0,88	0,29	Bueno/Excelente	No signif.
1376	3567	382,3	3542	443,3	0,58	0,54	Adecuado/Bueno	No signif.
1381	5138	520,8	4525	599,4	0,02	0,93	Muy pobre	Significativa

Se aplicó el criterio estadístico -subjetivo- propuesto por Witczak [6, 7] para evaluar la correlación existente entre los valores del Módulo Resiliente, ya sean de la capa superior y de la capa inferior.

La valoración de correlación que emplea, se encuentra reflejada en la Tabla 3:

Criterio	R <sup>2</sup>	Syx/Sy
Excelente	0,90	0,35
Bueno	0,70 - 0,89	0,36 - 0,55
Adecuado	0,40 - 0,69	0,56 - 0,75
Pobre	0,20 - 0,39	0,76 - 0,89
Muy Pobre	0,19	0,90

En donde:

R<sup>2</sup>: Coef. de correlación (dispersión de puntos)

Syx: Error típico de la estimación de los valores

Sy: Desviación estándar de valores medidos

Tabla 3

El error estándar de estimación representado por el símbolo Syx mide la dispersión de los valores observados alrededor de la línea de regresión.

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum y^2 - a(y) - b(\sum xy)}{n - 2}} \quad (1) \quad a = \frac{\sum y}{n} - \frac{b_1 \sum x}{n} \quad (2) \quad b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (3)$$

Donde:

a ; b: Coeficientes de intercepción y tamaño utilizando el método mínimo de cuadrados

y ; x: Variables (capa superior x ; capa inferior y)

Los valores promedio muestran para todos los lotes, que los registros determinados en los testigos correspondientes a la capa superior son mayores a los de la capa inferior.

El análisis estadístico siguiendo la metodología de Witczak, arroja que dos lotes -1372 1381- poseen según dicho criterio un comportamiento pobre a muy pobre.

También se efectuó un análisis de varianza ANOVA, para un intervalo de confianza del 95%, resultando en el último lote que existe una variación significativa entre los testigos de la capa superior e inferior. En este sentido ha sido detectada una mayor dispersión entre valores individuales, pero todos ellos se encuadran dentro de la tolerancia o variabilidad posible que posee la metodología de ensayo [8, 9].

Los registros alcanzados sobre los testigos luego de un año de servicio han sido los siguientes:

Tabla 4

LOTE	Edin Sup		Edin Inf		R <sup>2</sup>	Se/Sy	Criterio	ANOVA
	Promedio	ds St	Promedio	ds St				
1612	5330	381,3	4789	460,2	0,74	0,32	Excelente	No signif.
1614	5115	423,8	5033	331,0	0,80	0,30	Bueno	No signif.

En definitiva a un año de ejecutada la obra, los testigos poseen una rigidez a 20°C muy similar a los determinados originalmente, no habiéndose producido un efecto de endurecimiento del asfalto que afecte la flexibilidad del material en su conjunto. Esta afirmación se corrobora con los valores de Viscosidad Brookfield alcanzados luego de efectuarse su extracción siguiendo la norma indicada en 2.2.

Tabla 5

VISCOSIDAD Brookfield NORMA IRAM 6837			
Testigo	Temp [°C]	Spindle	Viscosidad [dPas]
471			13013.0
464	60	SC4-29	10925.0
465			12480.0

## CONSIDERACIONES FINALES

- Un estricto control tanto en los procesos de elaboración como de puesta en obra y posterior recepción, disminuye los eventuales fallos no asignables que pudieran aparecer.
- La utilización de mezclas asfálticas empleando Rap con tenores del orden del 15 al 20%, en subbases asfálticas, ha permitido reutilizar dicho material logrando una serie de ventajas comparativas como es la reducción de costos por el menor empleo de materiales vírgenes, disminución del impacto ambiental al verse limitada la intervención en canteras de agregados pétreos.
- Asimismo el alto espesor en 18 cm, en que ha sido colocada la capa inferior, posibilita el acortamiento de los plazos de obra, generando ventajas económicas -visto desde un punto de vista operacional-, al poder habilitarse anticipadamente la vía y también se favorece el ahorro de materiales, equipo y mano de obra (menor intervención). En definitiva se generan ahorros, que favorecen tanto el comitente como la contratista.
- El empleo de rodillos lisos con posibilidad de emplear compactación inteligente oscilatoria, ha sido fundamental para garantizar los resultados alcanzados en el espesor señalado.
- Evaluando el proceso integrador durante la elaboración, puesta en obra y recepción de la mezcla asfáltica y siguiendo en forma estricta el cumplimiento del plan de calidad propuesto, se han obtenido resultados de ensayos que hacen factible el empleo y la colocación de la mezcla asfáltica en elevado espesor. Los buenos resultados obtenidos han sido corroborados a través de la determinación de vacíos y del módulo dinámico resiliente.
- El análisis de los parámetros mecánicos y volumétricos de los nuevos testigos extraídos y ensayados a un año de su ejecución, muestra que el material posee prácticamente las mismas propiedades por la respuesta viscoelástica que brinda al ser sometida a cargas, con lo que se puede afirmar que el proceso de degradación y envejecimiento ligante aún no ha comenzado a manifestarse.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] B.H. Román Cabrera” Compactación Inteligente en Pavimentos Asfálticos: Oportunidades y Retos de Implementación”. XIV Congreso Internacional de Infraestructura Vial - Lima, Perú (2015)
- [2] Multicool. <http://www.eng.auburn.edu/users/timmdav/MultiCool/FinalRelease/Main.html>
- [3] J.M.Baena Rangel, J.García Santiago. “Estudio sobre el efecto de las segregaciones térmicas en la durabilidad de las mezclas bituminosas en caliente”. AEC Revista Carreteras N°155(2007).
- [4] L.Daguerre, D.Larsen, E.Williams, B.Capra, E Mule; F.Nougues, A.Bisio “Compactación Inteligente, curvas de enfriamiento de mezclas asfálticas colocadas en elevado espesor. Caso Práctico”. XVIII CILA. Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Bariloche. 2015
- [5] Norma EN 12697-26, Mezclas bituminosas - Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente – Parte 26: Rigidez.
- [6] Witczak M, .Kaloush K, Mel-Basdyouny, HVonQuintus.”NCHRP Report 465 Simple Performance Test for Superpave Mix Design”. TRB (2001)
- [7] G. Garcia; Marshall Thompson “HMA Dynamic Modulus Predictive Models-A Review”. Research Report FHWA-ICT-07-005 Illinois Center Transportation 2007
- [8] ERav Brown: Kee Y Foo.” Evaluation of variability in resilient modulus test (ASTM

## **SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO REFORZADAS A CORTE CON LÁMINAS DE FIBRAS DE CARBONO**

M. Braun<sup>1,2,\*</sup>, E.I. Villa<sup>1</sup>, G. Fournier<sup>1</sup>, M. Miño<sup>1</sup> y C.Rocco<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Construcciones, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata.  
Calle 48 y 115 s/n, (B1900TAG) La Plata, Buenos Aires, República Argentina

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigación Científicas y Técnicas (CONICET) CCT La Plata.  
Calle 8 N° 1467, (B1904CMC) La Plata, Buenos Aires, República Argentina

\* E-mail: matias.braun@ing.unlp.edu.ar

### **1. INTRODUCCIÓN**

En las últimas dos décadas, se han realizados grandes progresos en diversas técnicas de refuerzo de estructuras de Hormigón Armado (HA) existentes, o para la reparación de estructuras deterioradas. Entre estas técnicas podemos mencionar los refuerzos externos de láminas de fibras de carbono (LFC). Las principales ventajas que presentan este tipo de refuerzo están relacionadas a su bajo peso, y su alta resistencia, rigidez y durabilidad. Además, este material presenta muchas facilidades para el pegado superficial, ya que su flexibilidad permite adaptarse a la forma de la superficie de la estructura.

Numerosos autores han presentado resultados numéricos y experimentales, sobre vigas de HA reforzados con LFC sometidas a esfuerzos de flexión. En estos resultados se ha podido contrastar que los modelos numéricos son capaces de predecir con buena precisión la carga última a flexión, observando que el uso de este tipo de refuerzo puede duplicar la capacidad resistente a flexión de las vigas [1,2].

Sin embargo, cuando se incrementa la capacidad a flexión, puede darse en la estructura que la carga se acerque a la capacidad máxima de corte. Tälsjten [3] mostró mediante ensayos, que en estructuras con refuerzos a flexión se podían inducir fallos a corte. Dicho de otro modo, una estructura con un fallo frágil a corte puede ser reforzada de modo tal que cambie el modo de fallo por uno más dúctil [4]. Es importante destacar que en el diseño de viga se debe tener un cierto margen de seguridad contra el fallo por corte, ya que este tipo de fallo es más peligroso y menos predecible que el fallo por flexión [5].

Existen numerosos métodos para reforzar estructuras a corte, como refuerzos adicionales cubiertos con hormigón proyectado, o con sujeciones de acero, por mencionar algunos [6-8]. Otra alternativa a los métodos tradicionales es la adherencia superficial de láminas de fibras de carbono mediante resinas epoxídicas. Aunque las deficiencias por corte no son el único problema que enfrentan las estructuras, se hacen cada vez más frecuentes, y existe una gran necesidad de fortalecer y reacondicionar para aumentar la capacidad frente a este tipo de solicitaciones [9-11].

En este trabajo se presenta la validación de un modelo numérico con datos experimentales, extraídos de la literatura [11], de probetas de hormigón armado reforzadas en ambas caras laterales con LFC, adheridas con una resina epoxi. Se han analizados seis probetas ensayadas a flexión anti-simétrica. Algunas, han sido pre-fisuradas por una precarga, y

posteriormente reparadas con la inyección de resinas en el interior de las fisuras, y luego reforzadas con LFC. Para poder modelar el proceso de prefisuración de las vigas ha sido necesario desarrollar un código en MatLab que permite considerar la degradación de las propiedades mecánicas en el hormigón en función de la variable de daño.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

En el presente trabajo se ha modelado una estructura discretizando de manera diferenciada las barras de acero de refuerzo, el hormigón y el refuerzo de láminas de fibras de carbono (LFC). El comportamiento no lineal de cada uno de estos materiales ha sido simulado empleando los modelos constitutivos apropiados en cada caso, que se encuentran disponibles en la librería del código comercial Abaqus/Standard [12]. En esta sección se describen las leyes constitutivas empleadas para cada uno de los materiales involucrados en el análisis.

### 2.1. Barras de Acero

Las barras de acero utilizadas para el refuerzo longitudinal y transversal se han modelado asumiendo un comportamiento elasto-plástico. Por lo tanto, el modelo constitutivo del acero ha sido definido por la tensión de fluencia  $\sigma_y$ , la tensión de rotura  $\sigma_R$ , el Coeficiente de Poisson  $\mu_s$  y el Módulo de Young  $E_s$ .

Las barras de acero fueron modeladas con elementos tetraédricos de 8 nodos (C3D8) disponible en la librería del código comercial [12].

### 2.2. Hormigón

Como es sabido, el hormigón presenta distintos comportamientos cuando las solicitaciones son de tracción que cuando estas son de compresión. Por tal motivo, la caracterización mecánica del material requiere el conocimiento de la curva tensión-deformación en cada una de estas dos situaciones.

Debido a las dificultades que supone la determinación experimental de sus propiedades mecánicas, es una práctica habitual describir el comportamiento del hormigón a partir de su resistencia a la compresión uniaxial  $\sigma'_c$ . En el caso analizado este trabajo, el valor de  $\sigma'_c$  es 28.5 MPa.

La tensión de rotura a tracción  $\sigma_t$  se ha obtenido a partir de:

$$\sigma_t = 0.33\sqrt{\sigma'_c} \text{ MPa} \quad (1)$$

mientras que el módulo de elasticidad inicial del hormigón,  $E_c$ , ha sido relacionado con la resistencia a compresión mediante la siguiente ecuación:

$$E_c = 4700\sqrt{\sigma'_c} \quad (2)$$

El Coeficiente de Poisson del hormigón sometido a compresión,  $\mu_c$ , se encuentra en la mayoría de los casos en el rango comprendido entre 0.15 y 0.22, adoptando para el presente estudio un valor de 0.20. Para definir el comportamiento a compresión, se ha empleado la curva tensión-deformación propuesta por Saenz [13]. Debido a que la resistencia del hormigón para diferentes combinaciones de estados multiaxiales de tensiones es distinta en cada caso, en este trabajo se ha empleado la función de fluencia de Lubliner *et al.* [14], con la modificación propuesta por Lee y Fenves [15] que tiene en cuenta la evolución de la resistencia a tracción y a compresión.

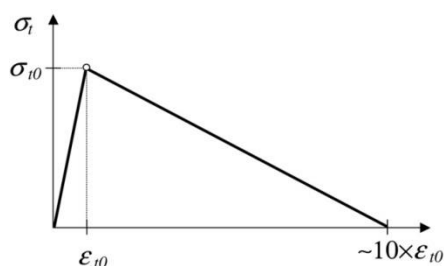


Figura 1: Curva tensión-deformación bilineal.

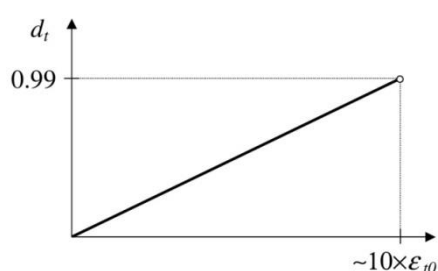


Figura 2: Evolución de la variable de daño.

Para definir el comportamiento a tracción se ha adoptado una ley bilineal, en la que la deformación de rotura es aproximada como 10 veces la deformación correspondiente a la tensión máxima [12]. En la Fig. 2 puede verse la ley lineal de evolución de daño adoptada en el presente trabajo.

Por último, para que quede completamente detallada la ley constitutiva, se han definido las variables  $\omega_t$  y  $\omega_c$  que establecen el comportamiento del hormigón frente a ciclos de carga y descarga uniaxial. En la Fig. 3 puede observarse una interpretación de estas variables. En este trabajo se ha adoptado  $\omega_c = 1$ , lo que implica que la rigidez a compresión se recupera al cerrarse la fisura, y  $\omega_t = 0$  de manera que la rigidez a tracción no se recupera cuando se desarrolla daño a compresión. El hormigón ha sido discretizado empleando elementos tetraédricos de 8 nodos (C3D8), con un mallado estructurado y regular.

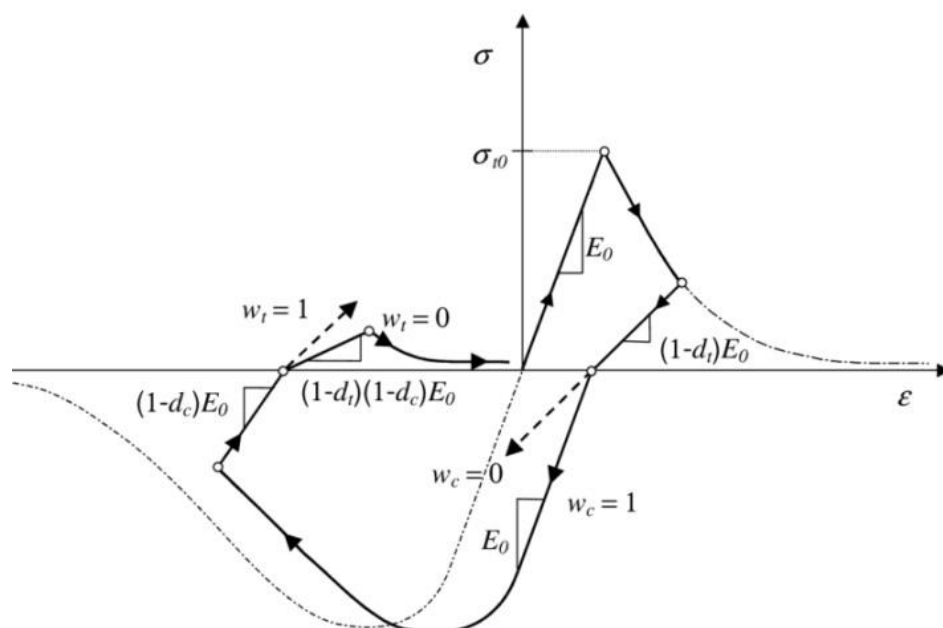


Figura 3: Ciclos de carga uniaxial (tracción-compresión-tracción).

### 2.3. Laminados de Fibra de Carbono

En este trabajo se ha empleado un análisis macroscópico para modelar el comportamiento general de los componentes estructurales que constituyen el material compuesto. Se ha considerado un comportamiento ortotrópico empleando la hipótesis de tensiones planas.

El criterio de inicio de daño empleado se basa en la teoría de Hashin [16], que define el punto a partir del cual comienza a existir una degradación de la rigidez. En este modelo se asume una curva de ablandamiento de tipo lineal, de manera que el comportamiento queda definido en función de las correspondientes Energías Específicas de Fractura.

### 3. CASOS ESTUDIADOS

En la Fig. 4 se presenta la configuración del ensayo, y la disposición de las barras de refuerzo, y láminas de material compuesto. Las probetas de los casos analizados tienen la misma sección transversal ( $150 \times 250 \text{ mm}^2$ ) y la distancia del tramo central sometido a corte de 700 mm.

El refuerzo principal (longitudinal) consiste en seis barras de acero de 13 mm de diámetro, colocadas como refuerzo superior e inferior, en cantidades iguales. Los estribos son de 5 mm de diámetro y con una separación de 100 mm. Se han dispuesto de modo que el vano central se encuentra libre de estribos.

Se aplicaron láminas dobles con orientaciones  $0^\circ + 90^\circ$ , en las caras laterales de la viga. Además, se dispuso una lámina con las fibras orientadas en la dirección del eje de la viga, en las superficies superior e inferior.

La probeta A fue inicialmente dañada por una pre-carga, y posteriormente reparado mediante la inyección de resina epoxi en los elementos totalmente dañados y después se reforzaron con LFC. La probeta B fue ligeramente dañada por una pre-carga y después se reforzaron con LFC. En el caso C en cambio se reforzaron desde el principio.

Para el modelado de las casos en los que existe prefisuración, se desarrolló un código en MatLab que permite desarrollar distintos materiales, de modo que se considera la degradación de las propiedades mecánicas del hormigón de acuerdo a la variable de daño asociada a cada elemento.

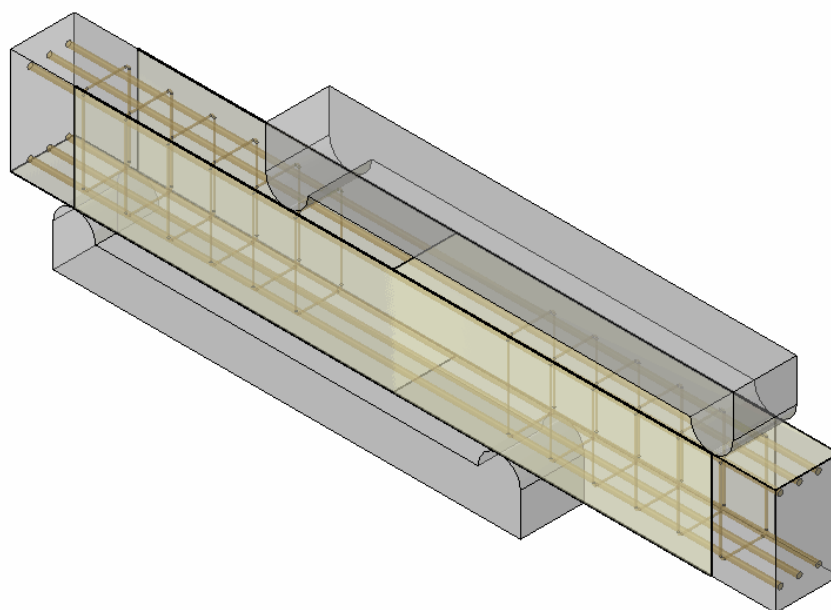


Figura 4: Configuración de ensayo y disposición de la armadura de refuerzo.

### 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Fig. 5 se comparan los patrones de fisuración experimentales y numéricos de la probeta A, para la situación en la que ésta no tiene refuerzos de LFC. Como puede observarse el modelo de elementos finitos es capaz de capturar el fenómeno estado de fisuración de la probeta.

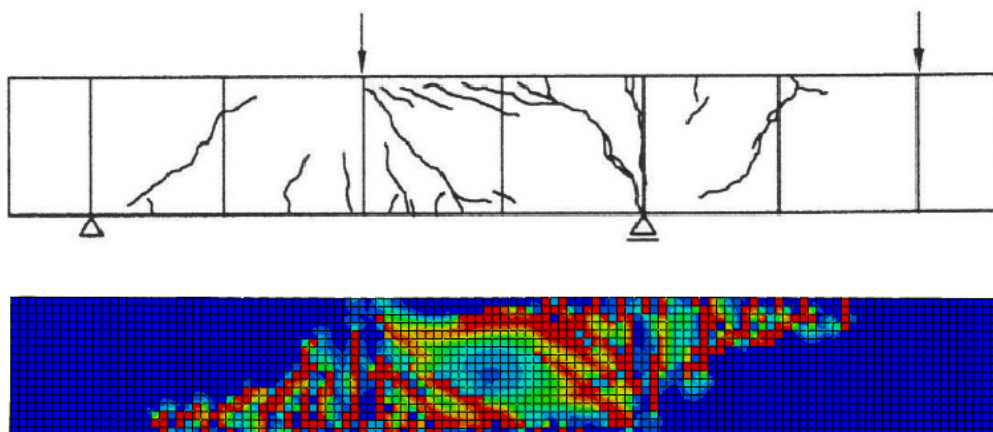


Figura 5: Comparación del patrón de fisuración obtenidos numérica y experimentalmente.

En la Fig. 6 se presentan las curvas fuerzas vs desplazamiento, para los distintos casos analizados. Además se han incorporado los valores de carga de rotura, obtenidos experimentalmente. En estos resultados se puede destacar la buena concordancia que existe entre resultados numéricos y experimentales para el caso de la viga sin refuerzo, donde el modelo predice una carga de rotura de 152 kN, mientras que experimentalmente se obtuvo 142.2 kN. Además, se observa que al incorporar los refuerzos de LFC aumentan tanto la carga de rotura como la ductilidad de la viga. También se evidencia que bajos niveles de prefisuración no generan grandes cambios en el comportamiento mecánico de la viga. Mientras que un proceso de prefisuración elevado, reduce considerablemente la eficiencia del refuerzo, además de bajar su rigidez.

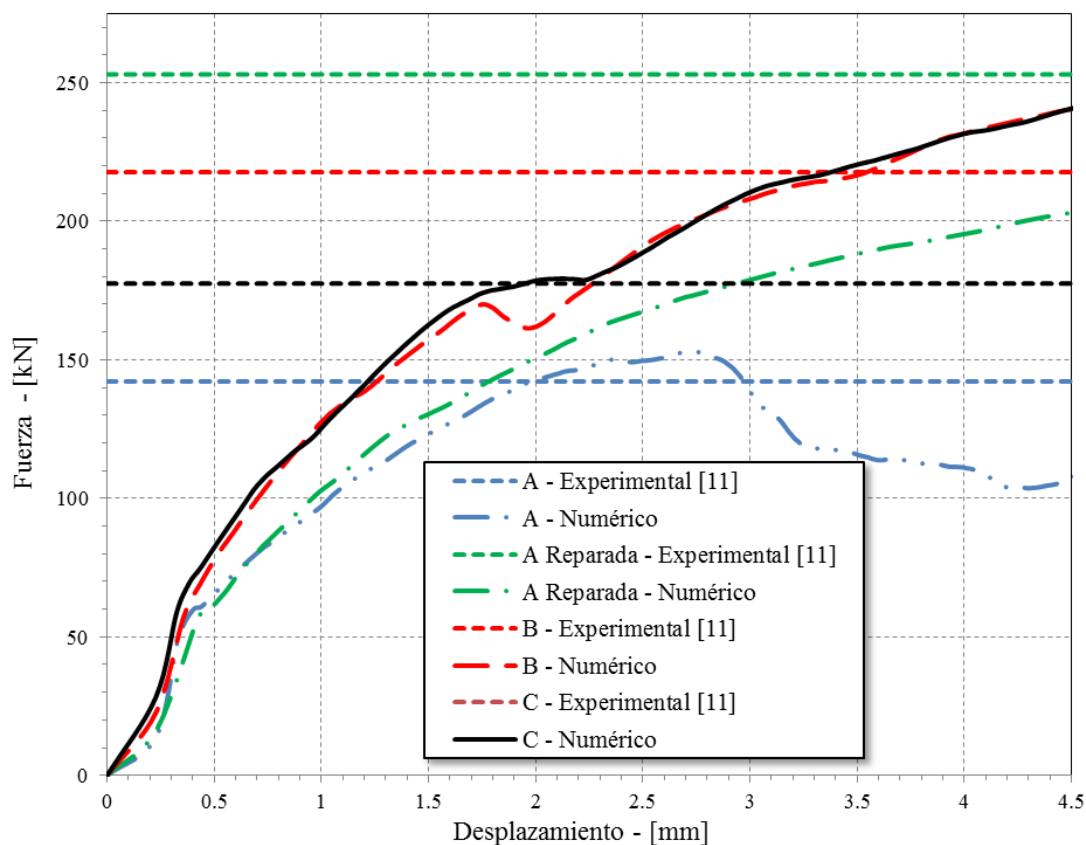


Figura 6: Curvas fuerza desplazamiento obtenidos numérica y experimentalmente.



## 5. CONCLUSIONES

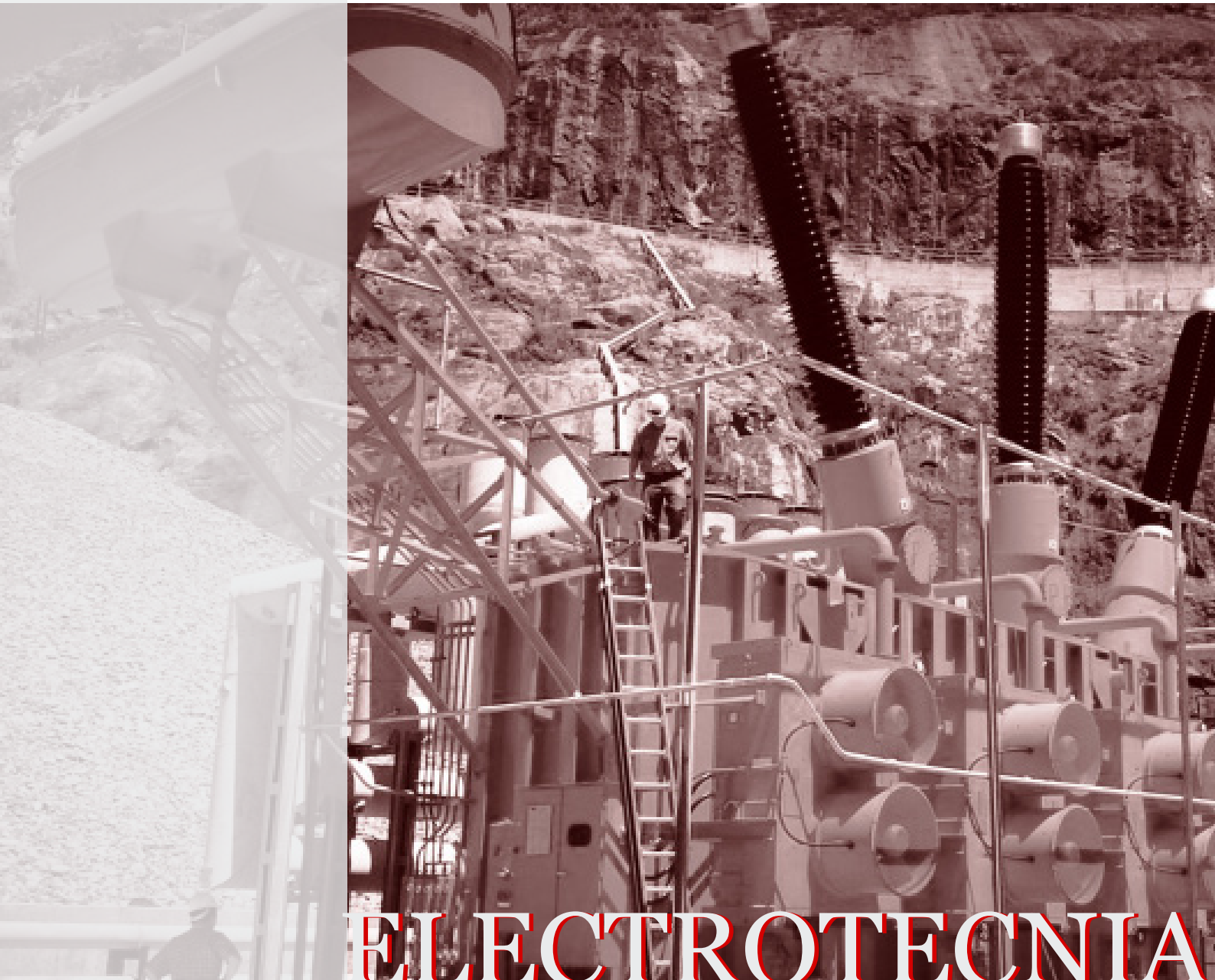
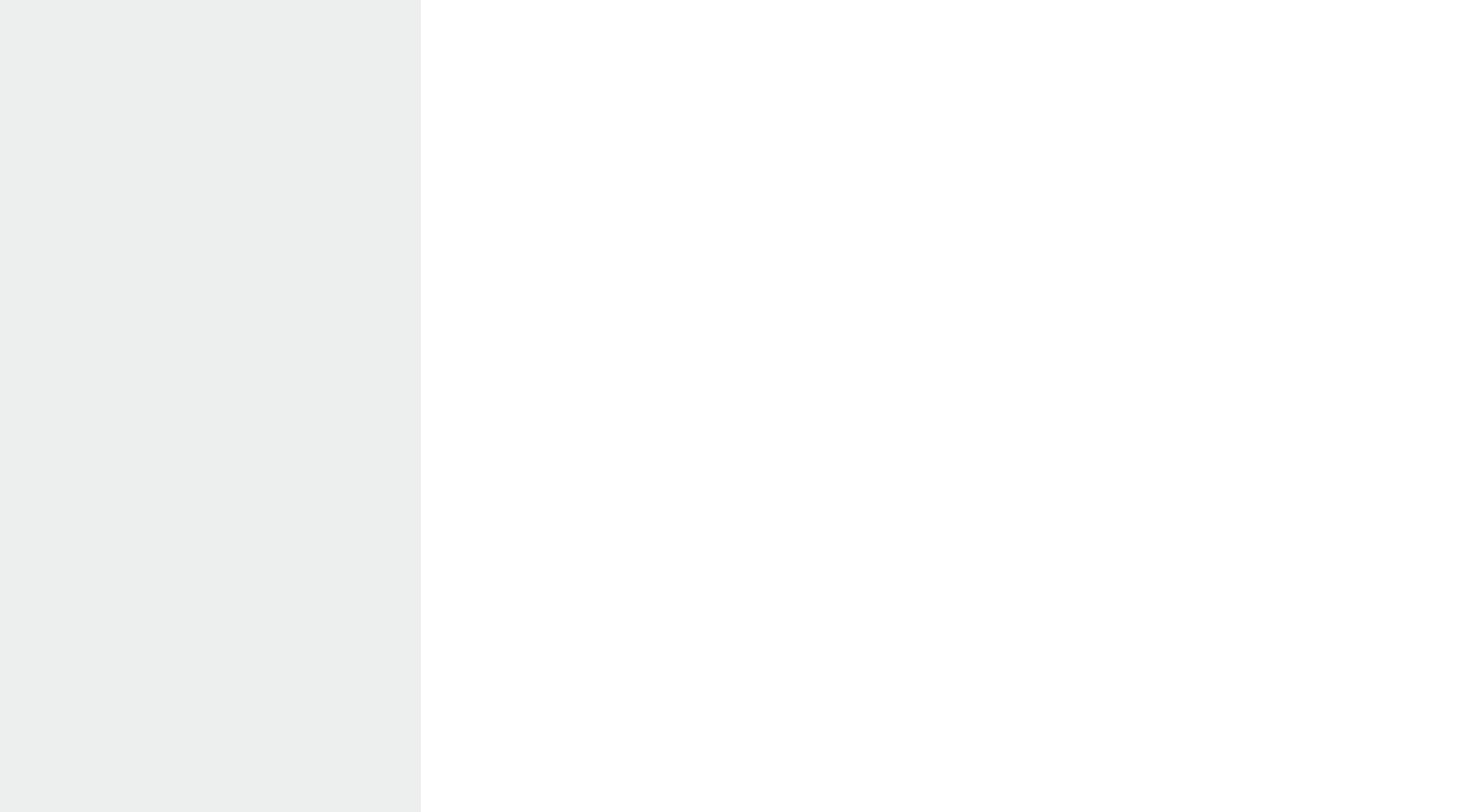
En este trabajo se ha llevado a cabo un modelo de análisis por elementos finitos, de vigas de hormigón armado reforzadas a sollicitaciones de corte, con láminas de fibras de carbono.

Se han analizados cuatro situaciones: una viga sin refuerzo, viga intacta con refuerzo, y vigas reforzadas con bajo y alto nivel de prefisuración. Para estos últimos dos casos, se ha desarrollado un código en MatLab que permite modelar la degradación de las propiedades mecánicas en el hormigón en función de la variable de daño.

Los resultados obtenidos muestran una buena concordancia con los resultados experimentales extraídos de la literatura.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hu, H.T., Lin, F.M. and Jan Y.Y., *Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete beams strengthened by fiber-reinforced plastics*. Composites Structures, 63:271-281, 2004.
- [2] Hu, H.T., Lin, F.M., Liu, H.T., Huang, Y.F. and Pan, T.C., *Constitutive modelling of reinforced concrete and prestressed concrete structures strengthened by fiber-reinforced plastics*. Composites Structures, 92:1640-1650, 2010.
- [3] Täljsten, B., Plate bonding, strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fiber reinforced plastics. PhD thesis, Lulea Univ. of Technology, Lulea, Sweden, 1994.
- [4] Collins, R. and Roper, H., Laboratory investigation of shear repair of reinforced concrete beams loaded in flexure. ACI Materials Journal, 97:149-159, 1990.
- [5] Al-Sulaimani, G.J., Sharif, A., Basunbul, I.A., Baluch, M.H. and Ghaleb, B.N., Shear repair for reinforced concrete by fiberglass plate bonding. ACI Structural Journal, 91:485-464, 1994.
- [6] Pellegrino, C. and Modena, C., Fiber-reinforced polymer shear strengthening of reinforced concrete beams with transverse steel reinforcement. Journal of Composite for Construction, 6:104-111, 2002.
- [7] Micelli, F., Annaiah, R. and Nanni, A., Strenghtening of short shear span reinforced concrete T joists with fiber-reinforced plastic composites. Journal of Composites for Construction, 6:264-271, 2002.
- [8] Diagana, C., Li, A., Gedalia, B, and Delmas, Y., Shear strengthened effectiveness with CFF strips. Engineering Structures, 25:507-516, 2003.
- [9] Carolin, A. and Täljsten, B., Theoretical study of strengthening for increased shear bearing capacity. Journal of Composites for Construction, 9:497-506, 2005.
- [10] Carolin, A. and Täljsten, B., Experimental study of strengthening for increased shear bearing capacity. Journal of Composites for Construction, 9:488-496, 2005.
- [11] Yoshiyuki, M., Kiyoshi, M., Koji, T. and Hiromichi S., A study on shear reinforcement of reinforced concrete beams externally bonded with carbon fiber sheets. Composite Interfaces, 5:285-295, 1997.
- [12] ABAQUS, *User's Manual Version 6.13*, Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc, 2014.
- [13] Sanz, L.P., *Discussion of Equation for the stress-strain curve of concrete*. ACI Journal Proceedings, 61:1229-1235, 1964.
- [14] Lubriner, J., Oliver, J., Oller, S. and Oñate, E., *A Plastic-Damage Model for Concrete Structures*. Journal of Engineering Mechanics, 25:229-329, 1989.
- [15] Lee, J. and Fenves, G.L., *Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures*. Journal of Engineering Mechanics, 124:892-900, 1998.
- [16] Hashin, Z., *Failure criteria for unidirectional fiber composites*. Journal of Applied Mechanics, 47:329-334, 1980.



# ELECTROTECNIA

# ANÁLISIS DE BALANCE DE FLUJOS METABÓLICOS APLICADO A LA PRODUCCIÓN DE LÍPIDOS MICROBIANOS.

Castañeda, M. Teresita<sup>1,2✉</sup>; Nuñez, Sebastián<sup>1</sup>; Voget, Claudio<sup>2</sup>; Garelli, Fabricio<sup>1</sup>; De Battista, Hernán<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Grupo de Control Aplicado (GCA), Instituto LEICI, UNLP-CONICET, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

<sup>2</sup>Centro de Investigación y Desarrollo en Fermentaciones Industriales (CINDEFI), UNLP-CONICET, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.  
Calle 47 y 115, (B1900ASH), La Plata, Argentina. Tel.: +54 221 483-3794.  
e-mail: castaneda@biotec.quimica.unlp.edu.ar

**Palabras clave:** Análisis de balance de flujos metabólicos, lípidos microbianos, *Rhodospiridium toruloides*.

## 1.-INTRODUCCIÓN

Los lípidos microbianos han adquirido relevancia en los últimos años por su creciente empleo en la producción de biodiesel [1, 2]. Este biocombustible constituye una alternativa a la utilización de combustibles fósiles y, de este modo, contribuye a la reducción del impacto ambiental. Estos “biolípidos” son obtenidos mediante procesos biotecnológicos, empleando microorganismos oleaginosos capaces de acumular más del 20% de su peso seco en lípidos, principalmente en forma de triglicéridos (TAG) [1]. *Rhodospiridium toruloides* es una de las especies de levaduras oleaginosas más empleadas debido a su versatilidad nutricional, su elevado rendimiento lipídico y la calidad del perfil de ácidos grasos obtenido [3, 4]. No obstante, uno de los factores limitantes para la utilización de estos procesos en gran escala, es el costo de producción [5]. Es por ello, que resulta indispensable la optimización del proceso incluyendo la composición del medio de cultivo y la estrategia de cultivo empleada. Típicamente, se utiliza una estrategia de producción de TAG en dos etapas. La primera, está dirigida a la producción de elevadas concentraciones de biomasa, generalmente mediante cultivos sumergidos bajo limitación por carbono. En la segunda etapa, por otro lado, se induce la formación de lípidos mediante la limitación de un nutriente esencial para el crecimiento, con la consiguiente asimilación del carbono remanente en el medio de cultivo mediante la acumulación de TAG [6]. Con este modo de operación se han reportado procesos con limitación en nitrógeno [7], fosfato [8], azufre [9], etc. con diferentes relaciones molares entre carbono y el nutriente limitante (C/N, C/P y C/S, respectivamente).

La ingeniería metabólica es una disciplina muy útil a la hora de optimizar procesos biológicos. Dentro de esta disciplina, el Análisis de Balance de Flujos Metabólicos (FBA) es una herramienta muy eficaz para predecir, vía simulación, el comportamiento microbiano frente a diferentes perturbaciones externas [10]. A su vez, mediante el desarrollo de mapas metabólicos adecuados, permite la optimización del proceso *in silico* para luego llevar a cabo la correspondiente validación *in vitro*.

Recientemente, Bommarreddy *et al.* [12] reportaron un modelo metabólico de *R. toruloides* para la producción de TAG en cultivo sumergido. En dicho trabajo, emplearon Modos Elementales (EM) [13] como herramienta para el cálculo de los rendimientos máximos de TAG con diferentes fuentes de carbono, en sistema de cultivo por lotes (batch).

En el presente trabajo, se emplea el modelo metabólico de *R. toruloides* descrito por Bommarreddy *et al.* para la optimización de la producción de TAG mediante FBA, y se contrasta con los rendimientos máximos obtenidos en el citado trabajo. Adicionalmente, se proponen mejoras al citado modelo, con el objetivo de simular más fehacientemente el comportamiento microbiano y alcanzar rendimientos acordes a los resultados experimentales.

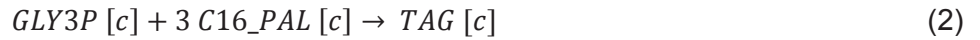
## 2.-MODELO Y MÉTODO DE ANÁLISIS

A continuación se describen brevemente algunos aspectos importantes del modelo bajo estudio y los métodos utilizados en el análisis.

### 2.1.- Modelo metabólico de *R. toruloides* para la producción de lípidos.

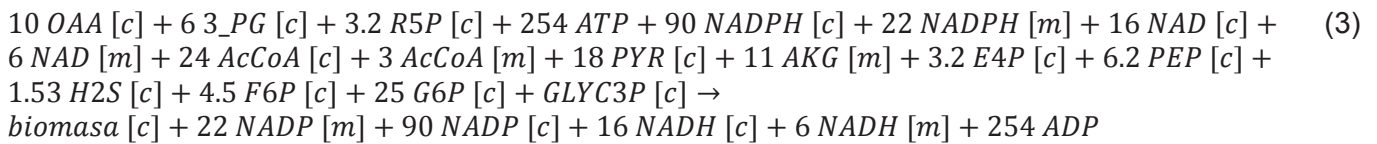
En la Fig. 1 se presenta el modelo metabólico de una cepa de *R. toruloides* [12]. Se trata de un modelo aeróbico, con 85 reacciones y 69 metabolitos, con los que se describe las principales rutas metabólicas del microorganismo: glucólisis, ruta de pentosas fosfato, ciclo de Krebs y ciclo del glioxilato. En dicho modelo se representan dos compartimentos intracelulares: el citosol [c] y la mitocondria [m], por lo que se tienen reacciones de intercambio entre los mismos. Los metabolitos se dividen en dos grupos: los

metabolitos extracelulares o de intercambio con el medio y los metabolitos intracelulares o intermediarios metabólicos. Dentro de los metabolitos extracelulares se encuentran las fuentes de carbono (glucosa, glicerol, xilosa y arabinosa), fuente de nitrógeno (NH<sub>3</sub>), O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y (SO<sub>4</sub>)<sup>-2</sup>. La producción de TAG se representa con las siguientes reacciones:



Nótese a partir de la ecuación (2) que una molécula de TAG se produce a partir de tres moléculas de ácido palmítico (C16\_PAL, ácido graso tomado como referencia) y una molécula de glicerol 3-fosfato (GLYC3P). La producción de C16\_PAL (1) requiere elevadas cantidades de NADPH, y tiene un consumo energético alto. Por su parte, el GLYC3P puede provenir de la asimilación directa de glicerol o bien producirse a partir de dihidroxiacetona fosfato (DHAP) mediante la deshidrogenasa correspondiente (GPD1).

Por otro lado, el modelo incluye una fórmula de biomasa obtenida por combinación de precursores metabólicos necesarios para la duplicación celular. En el modelo original, ésta es obtenida a partir de datos bibliográficos para *Saccharomyces cerevisiae* [14]:



Al igual que en otros modelos metabólicos la energía necesaria para el mantenimiento no asociado al crecimiento (NGAM) se incorpora al modelo mediante la siguiente reacción (ATPM):

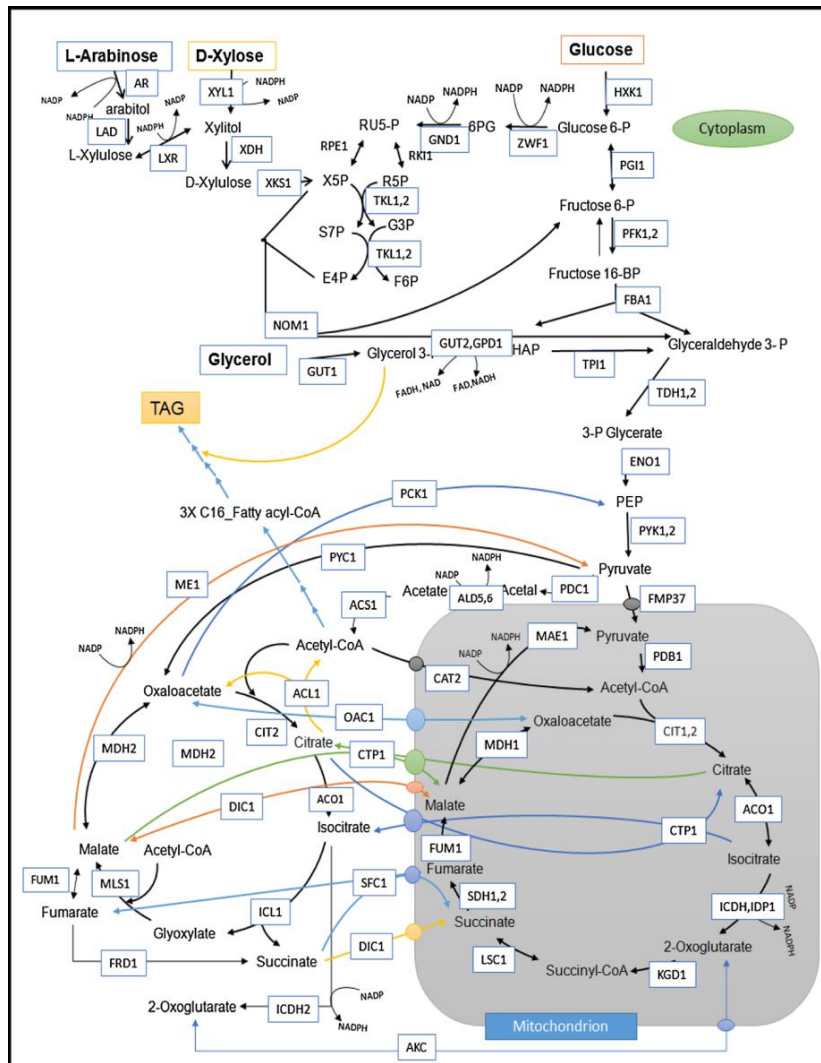


Figura 1. Modelo metabólico de *Rhodosporidium toruloides* [12]

Esta reacción ficticia permite considerar el flujo de ATP (mmol de ATP por unidad de biomasa y de tiempo) requerido en diferentes procesos no asociados al crecimiento [10].

## 2.2.- Análisis de balance de flujos metabólicos (FBA).

A partir de un balance de masas puede encontrarse un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen la evolución temporal de los metabolitos intracelulares:

$$\frac{dc}{dt} = Sv - \mu c \quad (5)$$

donde  $c = (c_1 \ c_2 \ \dots \ c_m)^T$  es el vector con las concentraciones de los  $m$  metabolitos,  $v = (v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n)^T$  es el vector de  $n$  flujos intracelulares,  $S$  es la matriz estequiométrica (de dimensión  $m \times n$ ) y  $\mu$  la tasa específica de producción de biomasa [13].

Dado que la dinámica intracelular es mucho más rápida que la extracelular, puede suponerse que la concentración de metabolitos intracelulares se encuentra en estado estacionario. En esa condición, y a partir de (5), se obtiene que el vector



de flujos debe cumplir la expresión  $Sv - \mu c = 0$ . Además, el término  $-\mu c$  puede ser despreciado con respecto a  $Sv$ , ya que su valor es mucho menor que los flujos metabólicos que afectan dicho metabolito. Luego, el valor de flujos en estado estacionario se obtiene de la ecuación general:

$$Sv = 0 \quad (6)$$

En los modelos metabólicos típicamente se tiene más cantidad de reacciones que de metabolitos ( $n > m$ ), lo que implica que el sistema es indeterminado y existen entonces  $n - m$  grados de libertad para definir la solución de (6). No obstante, el comportamiento celular es limitado por naturaleza, con lo cual es factible la reducción del conjunto de soluciones mediante la adición de restricciones que definan el espacio de soluciones factibles desde un punto de vista biológico. Algunos ejemplos de restricciones son las restricciones termodinámicas (determinan la irreversibilidad de algunas reacciones), y la capacidad máxima de las enzimas y de los transportadores (fijan el flujo máximo de las reacciones).

El análisis de balance de flujos es una técnica predictiva basada en restricciones en la que se considera que el comportamiento microbiano es óptimo para una dada función objetivo y, por ende, la distribución óptima de flujos se calcula siguiendo una rutina de optimización [13]. En términos matemáticos, se requiere resolver el siguiente problema de optimización lineal:

$$\begin{aligned} \text{máx.} \quad & Z = wv, \\ \text{sujeto a} \quad & Sv = 0, \\ & v_{min} \leq v \leq v_{max} \end{aligned} \quad (7)$$

donde  $w$  es el vector de coeficientes que define a la función objetivo ( $Z$ ) como una combinación lineal de los  $v_i$ . Los vectores  $v_{min}$  y  $v_{max}$  contienen las cotas mínimas y máximas para cada una de las reacciones. Esto permite incorporar información de las restricciones conocidas en los flujos (por ej. limitaciones en los flujos de entrada, de salida y de intercambio) y también indicar las reacciones que son irreversibles. La función objetivo utilizada en la definición del problema (7) puede ser una reacción o una combinación lineal de reacciones del modelo. En particular, la función objetivo más utilizada es la denominada ecuación de biomasa, ya que permite hacer predicciones consistentes con los datos experimentales [13]. Otras funciones objetivo que se pueden emplear para evaluar las capacidades de la red metabólica son: producción de ATP, la tasa de consumo de un determinado nutriente y la producción del metabolito de interés, entre otros [10]. También es posible realizar el cálculo de rendimientos, definidos como el cociente entre dos flujos de interés, para las condiciones impuestas por el usuario.

A diferencia del análisis predictivo obtenido por FBA, el análisis por modos elementales (EM) determina la potencialidad o capacidad del microorganismo, dicho de otro modo, todos los fenotipos que pueden ser expresados. Cada EM representa la ruta más simple, estequiométricamente y termodinámicamente posible, para la conversión de sustratos en productos [13].

### 2.3.- Metodología.

Las simulaciones fueron realizadas empleando el toolbox COBRA para Matlab [15]. El modelo metabólico de *R. toruloides* presentado en [12] fue cargado en el formato de datos adecuado con ayuda de la aplicación rBioNet [16]. Las soluciones de ecuación (7) fueron obtenidas con el solver glpk [17]. La matriz de modos elementales, utilizada para calcular los rendimientos óptimos reportados en [12], fue obtenida utilizando METATOOL 5.0 [18].

### 2.4.- Mejoras propuestas.

Para lograr predecir el comportamiento del microorganismo *in vivo*, algunas mejoras se han propuesto al modelo original [12]. En principio, no contempla la incorporación de nitrógeno, ya que la fórmula de biomasa solamente incluye la asimilación de C. Debido a ello, con el modelo actual sólo es posible calcular el rendimiento máximo de TAG, que es aquel en el cual no hay formación de biomasa, y viceversa. Por ende, no es posible un sistema donde coexistan biomasa y el producto de interés. Debido a ello, se contempla una disparidad entre los resultados predichos *in silico* de los valores experimentales reportados en dicho paper [12].

Para la incorporación de la asimilación de nitrógeno en el presente modelo, se incluyeron los aminoácidos glutamato (GLUT) y glutamina (GLUM) como precursores metabólicos en la fórmula de la biomasa. Para ello, se tomó como referencia la composición de aminoácidos en *S. cerevisiae* del trabajo [19] de donde se basaron para estimar el resto de los precursores presentes en la ecuación de biomasa utilizada por Bomareddy *et al.* Para estimar el flujo de ingreso de nitrógeno, se empleará una relación C/N (molar) reportada como óptima para la producción de lípidos [20].

Por otro lado, debido a que el modelo no fija un valor mínimo de mantenimiento no asociado al crecimiento, se sobreestima la producción de TAG. Para estimar el valor mínimo de ATPM para un determinado sustrato, se calcula el requerimiento de ATP para el mantenimiento no asociado al crecimiento (NGAM). Este puede determinarse a partir del coeficiente de mantenimiento celular, de la siguiente forma:

$$NGAM = m_s * y_{ATP/S} \quad (8)$$

donde  $y_{ATP/S}$  es el rendimiento máximo teórico de ATP y puede calcularse maximizando la reacción ATPM mediante FBA, para una tasa de ingreso de glucosa de  $-1 \text{ mmol/g h}$  [10]. Por otro lado, para la estimación del mantenimiento celular ( $m_s$ ), se emplearon los datos experimentales de Shen *et al.* [11].

### 3.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1.- Estimación de rendimientos máximos.

A partir del mapa metabólico de *R. toruloides*, Bommareddy *et al.* [12] calcularon los rendimientos máximos de TAG en diferentes fuentes de carbono (glucosa, glicerol, xilosa y arabinosa), mediante la relación entre los flujos (expresados como velocidades específicas) de TAG y sustrato (9), obtenidos por EM.

$$y_{TAG/S} = \frac{q_{TAG}}{q_S} \quad (9)$$

En el presente trabajo, se empleó el modelo original para calcular los flujos por FBA y poder comparar los rendimientos calculados, con los obtenidos en el trabajo anteriormente citado. Para llevar a cabo el cálculo de los flujos óptimos se utilizó como función objetivo la producción de TAG (2) y se maximizó dicha función. Bajo estas circunstancias, la producción de biomasa es nula, lo cual es acorde a la definición de rendimiento máximo. De manera análoga, se procedió a determinar el rendimiento máximo en biomasa, reemplazando la función objetivo por la reacción de crecimiento microbiano. En este caso, al maximizar la producción de biomasa, la producción de TAG resultó nula. Los resultados obtenidos, y los reportados previamente [12], se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Rendimiento máximo de TAG y biomasa respecto a diferentes FC.

Fuente de carbono	$y_{TAG/S}$ (Cmol <sub>TAG</sub> /Cmol <sub>S</sub> )		$y_{X/S}$ (Cmol <sub>X</sub> /Cmol <sub>S</sub> )	
	EM [12]	FBA	EM [12]	FBA*
Glucosa	0,58	0,578	0,67	0,669
Glicerol	0,63	0,628	0,73	0,727
Xilosa	0,55	0,552	0,66	0,647
Arabinosa	0,53	0,526	0,63	0,616

\* peso por Cmol calculado a partir de la composición elemental de *R. toruloides* [2,21,22].

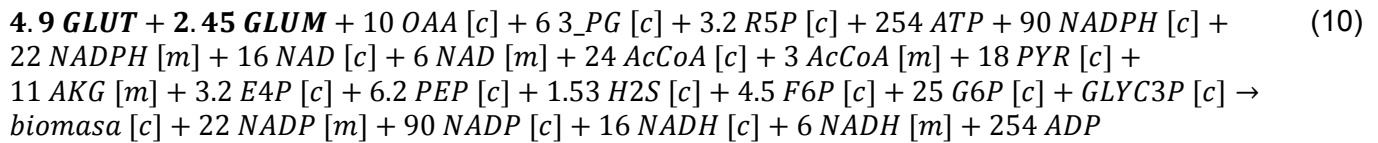
Se logró una muy buena correlación entre los datos reportados por Bommareddy *et al.*[12] y los obtenidos por FBA. La similitud entre estos resultados demuestra que FBA es una herramienta útil para determinar la potencialidad máxima del microorganismo, tanto para su crecimiento como para la producción de TAG. El conocimiento de esta potencialidad nos brinda la cota superior real de la cantidad de producto y biomasa que podemos obtener. Estos rendimientos son significativamente menores a los rendimientos máximos teóricos calculados a partir de los grados de reducción de los sustratos respecto a los productos que deseamos obtener y, es por ello que su cálculo resulta valioso.

#### 3.2.- Predicción del rendimiento real de TAG en las condiciones de cultivo establecidas.

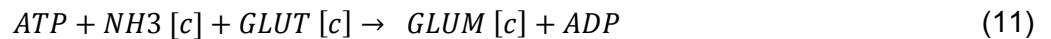
Si bien los cálculos anteriores permiten definir la potencialidad del microorganismo para producir TAG, dichos valores raramente pueden alcanzarse ya que el microorganismo ante todo prevalecerá el crecimiento. Solamente en condiciones donde un nutriente esencial para el crecimiento se agote, puede acumular el carbono remanente en forma de TAG. Es por esta razón que normalmente en medios con sustratos fácilmente asimilables como la glucosa, los rendimientos en TAG obtenidos experimentalmente suelen ser mucho menores a los rendimientos máximos predichos. En Bommareddy *et al.*[12], se presentan los datos experimentales obtenidos a partir del cultivo de glucosa como única fuente de carbono y energía. El rendimiento obtenido experimentalmente fue de  $0,229 \text{ Cmol}_{TAG}/\text{Cmol}_S$ , ~40% del valor máximo calculados por EM y FBA.



Para lograr predecir el comportamiento *in vivo* del microorganismo en las condiciones de cultivo, se agregaron dos precursores a la fórmula original de biomasa (GLUT y GLUM), los cuales incorporan la asimilación de nitrógeno, ausente en el modelo original. A partir de esta modificación, la ecuación de biomasa queda representada de la siguiente manera:



Ambos precursores derivan del NH<sub>3</sub> incorporado a la célula y se producen a partir de las enzimas glutamina sintetasa (GLN1) y glutamato sintetasa (GLT1), de la siguiente manera:



Adicionalmente, la energía consumida para mantenimiento no asociado al crecimiento (NGAM) se calculó a partir de la ecuación (8). Por un lado, el rendimiento máximo de ATP en glucosa ( $y_{\text{ATP/S}}$ ) se determinó por FBA, resultando en un valor de 18,4 mmol<sub>ATP</sub>/mmol<sub>S</sub>. En cuanto al mantenimiento celular ( $m_s$ ) tiene un valor de 5.7 mg/g h, según datos experimentales de Shen et al. [11]. De esta manera, el NGAM resulta ser de 0.583 mmol<sub>ATP</sub>/g h. Luego, este valor es incorporado en el modelo como la restricción inferior del flujo de ATPM.

Con estas modificaciones se simuló el cultivo de *R. toruloides* en un medio limitado en nitrógeno, con una relación C/N (moles) igual a 100. Si bien se empleó como función objetivo la producción de TAG, teniendo en cuenta que el microorganismo tratará de asimilar toda la glucosa que hay en el medio y a su vez priorizará su crecimiento, se fijaron las restricciones estequiometrias en un valor constante tanto para la asimilación de fuente de carbono (FC), como de nitrógeno (FN). De este modo, se optimizó indirectamente la tasa de ingreso de glucosa ( $q_s$ ) así como también la tasa de crecimiento ( $\mu$ ). Los resultados de las simulaciones empleando glucosa como FC, se muestran a continuación:

Tabla 2. Contraste entre los rendimientos lipídicos obtenidos con glucosa como FC.

$y_{\text{TAG/S}}$	(Cmol <sub>TAG</sub> /Cmol <sub>S</sub> )
Máximo EM [12]	0,58
Máximo FBA	0,578
Experimental [12]	0,229
Predicho FBA	0,232

A partir de la incorporación de la asimilación de nitrógeno y de un valor de ATPM en el modelo de *R. toruloides*, se lograron obtener resultados muy similares a los experimentales. En este sentido, FBA no sólo constituye una alternativa a EM como método de estimación de rendimientos máximos, sino que también permite predecir el comportamiento del microorganismo en un entorno real, donde el crecimiento y la producción de TAG coexisten.

#### 4.-CONCLUSIONES

La aplicación de FBA para la optimización de la producción de TAG logró estimar resultados similares que la técnica de EM en lo que refiere a rendimientos máximos y también permitió analizar las capacidades de la red metabólica en diferentes condiciones. Éstas fueron simuladas a partir de la modificación de las cotas en las reacciones, la incorporación del metabolismo del nitrógeno y el gasto energético por mantenimiento no asociado al crecimiento. De esta forma, FBA logró predecir el comportamiento microbiano en un entorno real, transformándose en una herramienta útil a la hora de encarar un estudio metabólico, ya que posibilitaría el ahorro de recursos económicos y tiempo, ambos de gran importancia en la industria biotecnológica.

Futuros estudios estarán dirigidos a la validación experimental del modelo propuesto en diversos sistemas de cultivo y al estudio de la influencia de los componentes extracelulares en la producción de TAG (e.g. limitación por oxígeno).

## 5.-AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por proyectos de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT 2014-2394), CONICET (PIP 112-201501-00837) y la Universidad Nacional de La Plata (Proyecto I216).

## 6.-REFERENCIAS

- [1] Faife-Pérez, E. *et al.* (2012). Producción de biodiesel a partir de microorganismos oleaginosos. Una fuente de energía renovable. Parte I. Levaduras y bacterias. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 46(1):22-32.
- [2] Koutinas, A. A. *et al.* (2014). Design and techno-economic evaluation of microbial oil production as a renewable resource for biodiesel and oleochemical production. *Fuel*, 116:566-577.
- [3] Li, Q. *et al.* (2008). Perspectives of microbial oils for biodiesel production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 80(5):749-756.
- [4] Tanimura, A. *et al.* (2014). Selection of oleaginous yeasts with high lipid productivity for practical biodiesel production. *Bioresource technology*, 153:230-235.
- [5] Zhao, X., Hu, C., Wu, S., Shen, H., & Zhao, Z. K. (2011). Lipid production by *Rhodospiridium toruloides* Y4 using different substrate feeding strategies. *Journal of industrial microbiology & biotechnology*, 38(5), 627-632.
- [6] Li, Y., Zhao, Z. K., & Bai, F. (2007). High-density cultivation of oleaginous yeast *Rhodospiridium toruloides* Y4 in fed-batch culture. *Enzyme and microbial technology*, 41(3):312-317.
- [7] Wiebe, M. G., Koivuranta, K., Penttilä, M., & Ruohonen, L. (2012). Lipid production in batch and fed-batch cultures of *Rhodospiridium toruloides* from 5 and 6 carbon carbohydrates. *BMC biotechnology*, 12(1):1.
- [8] Wu, S., Hu, C., Jin, G., Zhao, X., & Zhao, Z. K. (2010). Phosphate-limitation mediated lipid production by *Rhodospiridium toruloides*. *Bioresource technology*, 101(15):6124-6129.
- [9] Wu, S., Zhao, X., Shen, H., Wang, Q., & Zhao, Z. K. (2011). Microbial lipid production by *Rhodospiridium toruloides* under sulfate-limited conditions. *Bioresource technology*, 102(2):1803-1807.
- [10] Orth, J. D., Thiele, I., & Palsson, B. Ø. (2010). What is flux balance analysis?. *Nature biotechnology*, 28(3):245-248.
- [11] Shen, H., Gong, Z., Yang, X., Jin, G., Bai, F., & Zhao, Z. K. (2013). Kinetics of continuous cultivation of the oleaginous yeast *Rhodospiridium toruloides*. *Journal of biotechnology*, 168(1):85-89.
- [12] Bommarreddy, R. R., Sabra, W., Maheshwari, G., & Zeng, A. P. (2015). Metabolic network analysis and experimental study of lipid production in *Rhodospiridium toruloides* grown on single and mixed substrates. *Microbial cell factories*, 14(1):1.
- [13] Llaneras, F., & Picó, J. (2008). Stoichiometric modelling of cell metabolism. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 105(1): 1-11.
- [14] Gruchattka, E., Hädicke, O., Klamt, S., Schütz, V., & Kayser, O. (2013). In silico profiling of *Escherichia coli* and *Saccharomyces cerevisiae* as terpenoid factories. *Microbial cell factories*, 12(1):1.
- [15] Schellenberger, J., Que, R., Fleming, R. M., Thiele, I., Orth, J. D., Feist, A. M., ... & Kang, J. (2011). Quantitative prediction of cellular metabolism with constraint-based models: the COBRA Toolbox v2.0. *Nature protocols*, 6(9):1290-1307.
- [16] Thorleifsson, S. G., & Thiele, I. (2011). rBioNet: A COBRA toolbox extension for reconstructing high-quality biochemical networks. *Bioinformatics*, 27(14):2009-2010.
- [17] GLPK (GNU Linear Programming Kit). <https://www.gnu.org/software/glpk> [Online; accessed 14-Dic-2016].
- [18] Von Kamp, A., & Schuster, S. (2006). Metatool 5.0: fast and flexible elementary modes analysis. *Bioinformatics*, 22(15):1930-1931.
- [19] Gombert, A. K., dos Santos, M. M., Christensen, B., & Nielsen, J. (2001). Network identification and flux quantification in the central metabolism of *Saccharomyces cerevisiae* under different conditions of glucose repression. *Journal of bacteriology*, 183(4):1441-1451.
- [20] Papanikolaou, S., Muniglia, L., Chevalot, I., Aggelis, G., & Marc, I. (2002). *Yarrowia lipolytica* as a potential producer of citric acid from raw glycerol. *Journal of applied microbiology*, 92(4):737-744.
- [21] Zhou, W., Li, Y., Zhang, Y., & Zhao, Z. (2011). Energy efficiency evaluation of lipid production by oleaginous yeast *Rhodospiridium toruloides*. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 108(1):119-126.
- [22] Cescut, J., Fillaudeau, L., Molina-Jouve, C., & Uribelarrea, J. L. (2014). Carbon accumulation in *Rhodotorula glutinis* induced by nitrogen limitation. *Biotechnology for biofuels*, 7(1):1.

# ACONDICIONAMIENTO DE LA REFERENCIA UTILIZANDO MODOS DESLIZANTES EN APLICACIONES DE SEGUIMIENTO DE CAMINO EN VEHÍCULOS SUBMARINOS AUTÓNOMOS

Juan Luis Rosendo<sup>1</sup>, Benoit Clement<sup>2</sup>, Fabricio Garelli<sup>3</sup>

<sup>1-3</sup>CONICET y Universidad Nacional de La Plata, C.C.91 (1900), La Plata

<sup>2</sup>Lab-STICC, UMR CNRS 6585, ENSTA Bretagne, 29806 Cedex 9, Francia

e-mail: <sup>1</sup>juanluisrosendo@gmail.com, <sup>2</sup>benoit.clement@ensta-bretagne.fr, <sup>3</sup>fabricio@ing.unlp.edu.ar

## 1. INTRODUCCIÓN

El seguimiento de caminos es una tarea normal en robótica. El objetivo es seguir un camino con exactitud y tan rápido como sea posible, entre estos objetivos surge el problema de la sintonización del controlador.

En este tipo de aplicaciones las restricciones del sistema y la cota de error admisible definen la máxima velocidad de seguimiento. Considerando controles tradicionales, se encuentran tres enfoques:

1. Utilizar una velocidad de seguimiento fija, que nunca sature los actuadores del robot.
2. Utilizar una velocidad de seguimiento fija pero mayor a la anterior, esto implica que al menos en algún punto del camino seguido los actuadores se saturaran.
3. Utilizar una velocidad de seguimiento variable, calculada para cada punto del camino seguido tomando en consideración las restricciones del sistema.

Es claro que las primeras dos opciones no son óptimas: (1) no aprovecha al máximo los actuadores, y (2) resulta en un error innecesario en el seguimiento del camino. Por otro lado, la opción (3) se ve mas prometedora pero en general el calculo en tiempo real para cada punto no es simple.

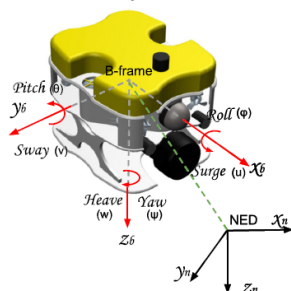


Figura 1: Marco-B y marco-NED de vehículos submarinos

Tamaño	0.525m (L) 0.406m (W) 0.395m (H)
Peso en el aire	15.56kg (sin pesos ni flotadores)
Direcciones controlables	Surge, Sway, Heave and Yaw
Propulsión	2 propelas verticales y 4 horizontales
Velocidad	2 knots (Surge) y 1 knot (Sway, Heave)
Profundidad máxima	50m
Autonomía	2-4 horas

Tabla 1: Características del Ciscrea

En este trabajo, una manera simple de implementar el enfoque (3) es experimentalmente probada. Esta idea fue presentada en [1] para un modelo cinemático, y aquí es expandida a un modelo dinámico. Para la demostración, la metodología es aplicada al vehículo submarino autónomo (AUV) Ciscrea, mostrado en la Fig. 1 y sus especificaciones pueden observarse en la Tabla 1.

## 2. DESARROLLO

En la técnica de acondicionamiento de la referencia a través de modos deslizantes (SMRC), un lazo auxiliar permite al sistema mantenerse en un área pre-especificada, cuando una restricción en el sistema esta a punto de ser violada. La Fig. 2 muestra este funcionamiento.

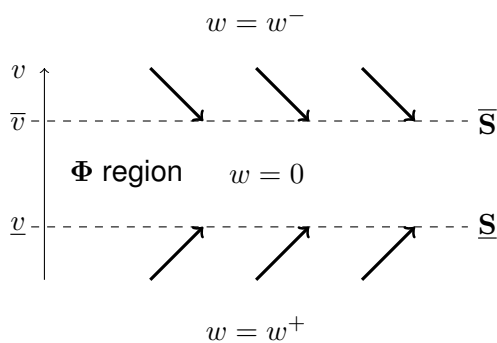


Figura 2: Interpretación gráfica de la ley de conmutación

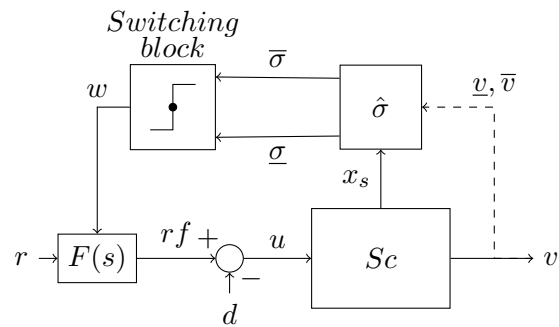


Figura 3: Diagrama en bloques de la técnica SMRC

Esta técnica ha sido desarrollada para ser aplicada en sistemas de estructura variable (VSS), y aprovecha de las no linealidades y restricciones de los mismos. Las ventajas de SMRC son: (i) solo depende del grado relativo del modelo, (ii) es robusta contra perturbaciones e incertidumbres, (iii) esta confinada al lado de baja potencia lo que facilita su implementación (ver [2] y [1] por detalles).

Considerando un sistema dinámico dado, estamos interesados en el comportamiento de una variable  $v$ , limitada por alguna restricción propia del sistema, en donde aplicaremos la técnica de SMRC. El sistema descrito por la Ec. 1 es representado por el bloque  $S_c$  en la Fig. 2.

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_s = f(\mathbf{x}_s) + g(\mathbf{x}_s)u \\ v = h_v(\mathbf{x}_s) \end{cases} \quad (1)$$

donde  $v$  es una variable acotada que debe cumplir con las restricciones de diseño. Para especificar las cotas de  $v$ , el siguiente conjunto es definido:

$$\Phi(\mathbf{x}_s) = \{\mathbf{x}_s \mid \phi(v) \leq 0\} \quad (2)$$

Nota:  $S_c$  es generalmente un subsistema de todo el sistema de control con restricciones, y la variable  $v$  puede corresponder a cualquier variable del sistema sujeta a restricciones.

El objetivo es encontrar una entrada de control  $u$  la cual haga al sistema permanecer en la región  $\Phi$ . Esto significa hacer  $\Phi$  una región invariante. Para esto el lado derecho de la primer linea de la Ec. 1 debe apuntar hacia el interior de  $\Phi$  en todos los puntos de la superficie limite:

$$\partial\Phi = \{\mathbf{x}_s \mid \mathbf{x}_s \wedge \phi(v) = 0\} \quad (3)$$

Esto puede ser garantizado por la política de conmutación del sistema dada por Ec. 4 (ver [1]).

$$u = \begin{cases} \leq u^\phi : \mathbf{x}_s \in \partial\Phi \wedge L_g\phi > 0 \\ \geq u^\phi : \mathbf{x}_s \in \partial\Phi \wedge L_g\phi < 0 \\ / \exists : \mathbf{x}_s \in \partial\Phi \wedge L_g\phi = 0 \\ free : \mathbf{x}_s \in \Phi \setminus \partial\Phi \end{cases} \quad (4)$$

con:

- $L_f h(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  es la derivada direccional de Lie, la cual representa la derivada de un campo escalar  $h(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  en la dirección de un campo vectorial  $f(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$

$$L_f h(x) = \frac{\partial h}{\partial x} f(x) \quad (5)$$

- De este modo:

$$u^\phi = -L_f\phi / L_g\phi \quad (6)$$

- y donde  $L_f\phi > 0$  fue asumido sin pérdida de generalidad.

De la Ec. 4 resulta que  $u$  puede ser libre dentro de la región  $\Phi$ . Usualmente dos enfoques son posibles:

- $u = 0$ : dejar que el sistema evolucione de manera autónoma, y la acción de control se activa solo cuando la restricción crítica es alcanzada.
- $u \neq 0$ : forzar el sistema a alcanzar los límites de la región y trabajar sobre ellos.

Usando el caso trivial de limitaciones dado por Ec. 7, con  $\tilde{v}$  representando las restricciones sobre  $v$ , podemos interpretar gráficamente la ley de conmutación como Fig. 2, donde  $w$  es la señal discontinua generada por el lazo de SMRC.

$$\sigma(v) = v - \tilde{v} \quad (7)$$

Para lograr el régimen de deslizate en  $\sigma(v) = 0$ , es necesario implementar un bucle auxiliar con una función de conmutación. Esta debe considerar las restricciones del sistema, para generar una señal discontinua  $w$ , ver Fig. 2. Con el objetivo de suavizar la señal de comando se agrega un filtro de primer orden:

$$F(s) : \begin{cases} \dot{x}_f = \lambda_f x_f + w + r \\ r_f = -\lambda_f x_f \end{cases} \quad (8)$$

Donde  $r$  es la referencia original del sistema y  $\lambda_f \in \mathbb{R}$  el autovalor del filtro.  $\lambda_f$  debe ser elegido de manera que el ancho de banda del filtro sea mayor al del sistema con restricciones, de forma que la respuesta del sistema no se deteriore cuando  $v$  se encuentra en su rango permitido.

Adicionalmente se debe mencionar que para que esta configuración funcione la salida auxiliar  $\sigma$  debe tener grado relativo unitario con respecto a la señal discontinua, es decir su primera derivada debe depender de  $w$ . Si por el grado relativo del sistema esto no se cumple se puede tomar estados extra del sistema  $x_s$  en la función de conmutación  $\phi$ , de manera de cumplir con la condición.

### 3. PARTE EXPERIMENTAL

La técnica de SMRC es adaptada al robot Ciscrea para generar un seguimiento de referencia con velocidad variable compatible con los límites de sus actuadores.

Para esta aplicación particular nos ocuparemos de la dirección vertical (heave) de movimiento. El modelo (ver Ec. 9 y Tabla 2) y simulador utilizado para este trabajo fue desarrollado en [4], donde mayor detalle en los coeficientes del mismo pueden ser consultados.

$$(M + M_A)^* \ddot{\eta} + D^*(|\nu|)(\dot{\eta}) + g^*(\eta) = \tau_{pro} + \tau_{env} \quad (9)$$

Aquí comparando con la notación de la sección 2,  $S_c$  esta compuesto por el lazo cerrado formado por el controlador, la saturación sobre la variable de control y el robot.

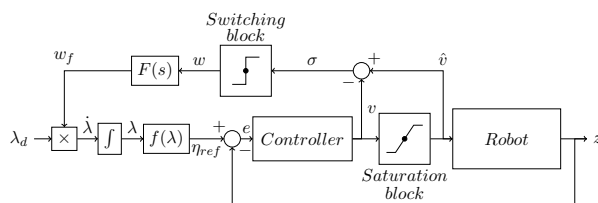
Adicionalmente, tenemos un filtro pasa bajos  $F(s)$ , y la parametrización del camino  $f(\lambda)$ . Una consideración importante es que suponemos que el camino es parametrizado en términos de un parámetro de movimiento y que su primera derivada es continua ([3]). Esto puede ser expresado como:

$$\eta_{ref} = f(\lambda) \quad \dot{\eta}_{ref} = \frac{\partial f}{\partial \lambda} \dot{\lambda} \quad (10)$$

En este caso:

- restricciones por saturación son impuestas sobre el torque.
- la señal  $\sigma$ , definida como Ec. 7, tiene grado relativo uno respecto de la señal discontinua  $w$ , y una saturación directa es implementada.
- la ley de conmutación es definida como:

$$w = \begin{cases} 1 & \text{if } \sigma = 0 \\ 0 & \text{if } \sigma \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$



Parámetros	Descripción
$\eta$	Vector de posición del AUV
$\nu$	Vector de velocidad del AUV
$M$	Matriz de masa e inercia de cuerpo rígido del AUV
$M_A$	Matriz de masa aumentada
$D( \nu )$	Matriz de amortiguamiento
$g(\eta)$	Vector de fuerzas y momentos de restauración
$\tau_{env}$	Perturbaciones ambientales (viento, olas y corrientes)
$\tau_{pro}$	Vector de fuerzas y momentos producidos por propelas

Figura 4: SMRC propuesta para el seguimiento de caminos

Tabla 2: Nomenclatura del modelo AUV

Cuando no existe saturación la ley de conmutación hace que la señal discontinua  $w$  tome el valor 1. Luego de pasar por el filtro una versión suavizada de  $w$  es multiplicada por  $\lambda_d$ , y subsecuentemente integrada para generar un parámetro creciente  $\lambda$ . Este parámetro alimenta el bloque de referencia  $f(\lambda)$  produciendo el camino de referencia para el controlador.

En pocas palabras, mientras no haya saturación el bucle auxiliar de SMRC permanece inactivo y la velocidad de la referencia esta fijada por  $\lambda_d$ . Cuando una saturación ocurre la señal  $w$  conmuta entre sus posibles valores (estableciendo un régimen de deslizamiento) forzando a disminuir la velocidad de referencia para que el controlador pueda reducir el error



de posición, finalmente cuando esta condición desaparece el bucle de SMRC regresa a su estado inactivo.

La sintonización de los distintos parámetros fue realizada a través de ensayos por simulación. Los valores usados son:  $\lambda_d = 0,2$ , la frecuencia de corte del filtro pasa bajos es  $f_c = 0,2387$  Hz, y el controlador utilizado es un proporcional derivativo filtrado (PD) ( $K_p = 541,43$ ,  $K_d = 250$ ,  $T_f = 2,3$ ).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo es comparar el comportamiento de un control tradicional PD, aplicado en la dirección vertical (heave) del Ciscrea, considerando una velocidad fija de referencia contra la técnica de velocidad variable explicada en la sección 3.

El controlador PD fue sintonizado para que el robot este en el borde de saturar los actuadores para el camino propuesto. Por el otro lado la técnica SMRC fue sintonizada para obtener el mismo error de seguimiento que el controlador clásico PD, ver Fig. 6.

La Fig. 5 muestra la comparación entre ambas técnicas, junto con sus correspondientes señales de referencia. El camino propuesto es una referencia sinusoidal en el eje vertical, aquí es importante remarcar que nosotros estamos interesados en el resultado espacial (seguimos un camino, no una trayectoria). De esta figura es posible ver como la técnica SMRC completa el camino 13.5 s mas rápidamente, lo que representa una mejora del 15 %.

La Fig. 7, muestra las señales de la técnica SMRC medidas sobre el robot. Podemos remarcar que entre el tiempo 0 s y 20 s no existe saturación, por lo que el lazo de SMRC se encuentra inactivo y el sistema evoluciona a la velocidad fijada por  $\lambda_d$ . Durante el tiempo 20 s a 35 s el robot entra en una parte mas cerrada del camino donde la velocidad impuesta por  $\lambda_d$  no puede ser seguida, como resultado ocurre la saturación en los actuadores. En esta condición, el bucle auxiliar conmuta  $w$  para frenar la referencia, permitiendo al controlador reducir el error de posición. Esto puede verse en la Fig. 5 donde puede notarse un «golpe» en la referencia de SMRC. En esta ultima condición el lazo de SMRC hace avanzar a la referencia de camino a la máxima velocidad que respeta los límites de saturación (ver Fig. 8). Luego de que esta condición desaparece el lazo SMRC se desactiva hasta el tiempo 58 s donde la condición de saturación es repetida.

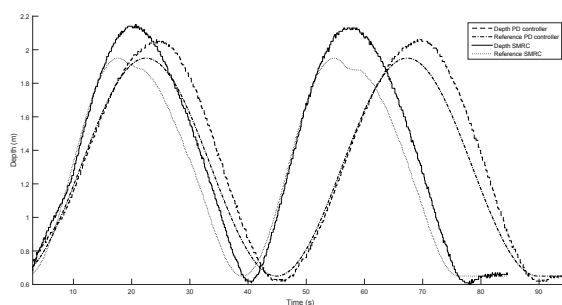


Figura 5: Comparación de caminos entre controlador PD y SMRC

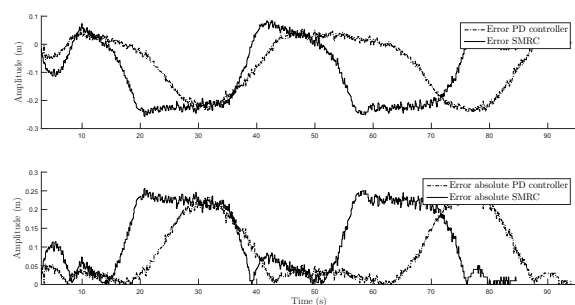


Figura 6: Comparación de error entre control PD y SMRC

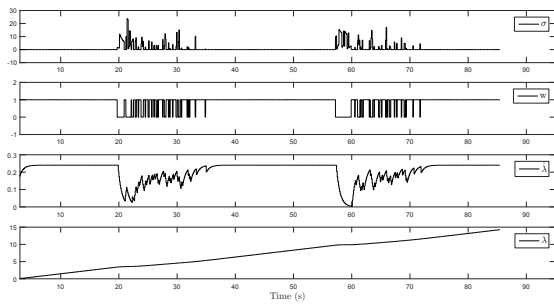


Figura 7: Señales de SMRC

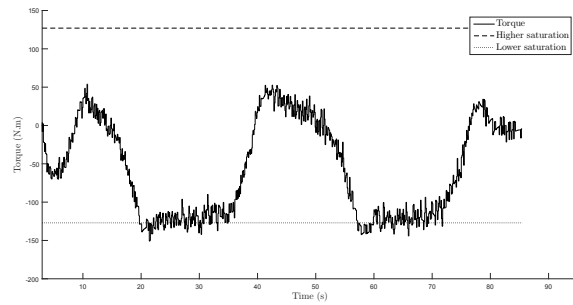


Figura 8: Torque con SMRC

## 5. CONCLUSIÓN

En este trabajo se probó que la técnica SMRC aplicada a un AUV en un marco de control dinámico, lo que constituye la principal novedad de este trabajo, funciona adecuadamente y reduce el tiempo de ejecución del camino. Sin embargo debe notarse que el sintonizado de los parámetros de la misma debe realizarse mas cuidadosamente que en un marco de control cinemático. Una cuestión que surge para futuros trabajos es la manera de compensar la dinámica lenta del sistema. Limitaciones sobre variables internas usando un esquema similar son soluciones parciales a explorar.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación fue parcialmente financiado por el programa de becas EIFFEL del Gobierno de Francia, por CONICET (PIP0361 y 0237), MINCYT(PICT2394) y UNLP(I164), Argentina.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] GARELLI, F., GRACIA, L., SALA, A., AND ALBERTOS, P. Switching algorithm for fast robotic tracking under joint speed constraints. *18th Mediterranean Conference on Control & Automation* (2010).
- [2] GARELLI, F., MANTZ, R. J., AND BATTISTA, H. D. *Advanced Control for Constrained Processes and Systems*. IET Control engineering series 75. 2011.
- [3] NENCHEV, D. Tracking manipulator trajectories with ordinary singularities: a null space-based approach. *International Journal of Robotics Research* 14, no.4 (1995), 399–404.
- [4] ROSENDO, J. L., CLEMENT, B., AND GARELLI, F. Sliding mode reference conditioning for path following applied to an auv. *10th IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems (CAMS 2016)* (2016).

## ESQUEMAS DE TRANSICIÓN ENTRE LAZO ABIERTO Y LAZO CERRADO PARA EL CONTROL DE GLUCOSA IN VIVO

Nicolás Rosales, Emilia Fushimi, Hernán De Battista y Fabricio Garelli

Grupo de Control Aplicado (GCA), Instituto LEICI, UNLP-CONICET. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Calle 1 y 47, La Plata, Buenos Aires, Argentina, B1900TAG – [nicolas.rosales@ing.unlp.edu.ar](mailto:nicolas.rosales@ing.unlp.edu.ar)

### INTRODUCCIÓN

La diabetes tipo 1 es una enfermedad crónica que se caracteriza por la destrucción autoinmune de las células beta del páncreas, que son las responsables de la secreción de insulina. La insulina es una hormona anabólica que estimula la absorción de glucosa y la sintetización de glucógeno. Por lo tanto, las personas con diabetes tipo 1 tienden a tener altos niveles de glucemia (presencia de glucosa en sangre), lo que puede causar complicaciones micro y macrovasculares. Hoy en día los tratamientos existentes que le permiten a las personas con ésta enfermedad mantenerse dentro de los límites de la normoglucemia (70 mg/dl - 180mg/dl) son: mediante varias inyecciones al día (MDI – Multiple Daily Injections); mediante bomba de infusión continua de insulina (CSII – Continuous Subcutaneous Insulin Infusion). Éste último permite la incorporación de algoritmos de control para regular la infusión de insulina por la bomba, con la ayuda de monitores continuos de glucosa (CGM – Continuous Glucose Monitor). Estos algoritmos deben ser validados in silico y luego ser puestos a prueba en humanos en ensayos clínicos supervisados. Las restricciones impuestas por la ruta subcutánea y la tecnología actual aún no permiten un control a lazo cerrado puro. Por esta razón, la gran mayoría de los ensayos clínicos que se llevan a cabo hoy en día evalúan una estrategia de control híbrida, es decir una combinación de un bolo de insulina (que se calcula con la información de la comida que será ingerida) y un algoritmo de control que entrega insulina durante el período postprandial sin anuncio de comidas (Kovatchev *et al.*, 2014, Tauschmann *et al.*, 2016).

Actualmente, varios grupos dentro de la comunidad científica se encuentran desarrollando estrategias de control automático, principalmente basadas en MPC y PID (Bondía *et al.*, 2010). Recientemente, se introdujo un nuevo método utilizando técnicas de control por modo deslizante llamado algoritmo SAFE (Safety Auxiliary Feedback Element) (Revert *et al.*, 2013). Este algoritmo funciona como una capa de seguridad sobre cualquier controlador principal (incluso controladores no lineales) y ha demostrado su capacidad de reducir el número y la severidad de los eventos de hipoglucemia (<70 mg/dl) (León-Vargas *et al.*, 2015), los cuales pueden causarle daños importantes al paciente, incluso la muerte. La hipoglucemia es, por lo general, producto de una sobreestimación por parte del controlador de la dosis de insulina que se debe entregar. El algoritmo SAFE permite introducir una restricción en la cantidad de insulina activa en el cuerpo (IOB – Insulin on Board), y funciona tanto para configuraciones de lazo híbrido como de lazo cerrado puro (completamente automáticas).

En este trabajo, se diseñó la restricción impuesta por el algoritmo SAFE en la IOB para su utilización en ensayos clínicos, con el objetivo de poder probar controladores híbridos y de lazo cerrado de manera segura. Con este fin, se propusieron dos modos de operación. El primero, llamado Time Enable, fue pensado para ser utilizado con configuraciones híbridas. Consiste en utilizar una restricción constante en la IOB con el objetivo de establecer un criterio temporal dado en el período postprandial para la transición entre la acción de lazo abierto y la de lazo cerrado. Si el objetivo del ensayo clínico es evaluar la respuesta de un controlador, entonces el tiempo en lazo abierto no debería ser demasiado prolongado. Por otro lado, si el tiempo en lazo abierto es demasiado corto, la acción del controlador podría causar un evento de hipoglucemia. Adicionalmente, el Time Enable se comporta como un mecanismo bumpless ya que permite que la transición de una terapia a la otra sea suave y gradual. El segundo modo de operación propuesto, llamado Amplitude Enable, fue diseñado para su uso con configuraciones completamente

automáticas. En este caso, la restricción en la IOB es un factor ( $>1$ ) del perfil variante en el tiempo de IOB, que se obtendría a partir de un tratamiento a lazo abierto para un mismo escenario de comidas. De esta forma, se asegura que la acción del controlador esté acotada dentro de un margen de la infusión de insulina de la terapia tradicional, permitiendo así realizar un ensayo de un controlador de lazo cerrado sin el riesgo de eventos de hipoglucemia severos.

El Algoritmo SAFE:

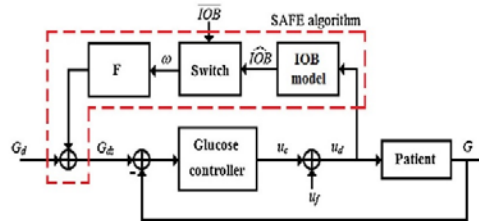


Figura 1

La figura 1 muestra un diagrama en bloques de un lazo de regulación de glucemia genérico con la capa de seguridad SAFE agregada. La señal  $u_f(t)$  es el bolo de insulina de lazo abierto. Para controladores completamente automáticos, esta señal es 0. El algoritmo SAFE cambia la referencia del controlador principal cuando la restricción impuesta en la IOB está por ser violada. Este algoritmo permite definir una restricción superior (para evitar episodios de hipoglucemia) y una inferior (para evitar episodios de hiperglucemia). En este trabajo, sólo se utilizará una restricción superior ( $\overline{IOB}$ ).

El primer bloque que constituye el SAFE es un modelo de IOB. En este bloque se estima la insulina activa, ya que ésta es inaccesible. El modelo de IOB utilizado es un sistema dinámico de dos compartimientos y se describe con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{C}_1}{dt}(t) = u_d(t) - K_{DIA}C_1(t) \\ \frac{dC_2}{dt}(t) = K_{DIA}(C_1(t) - C_2(t)) \\ \widehat{IOB} = C_1(t) + C_2(t) \end{cases} \quad (1)$$

donde  $C_1(t)$  y  $C_2(t)$  son los dos compartimientos,  $u_d(t)$  es la insulina total que es entregada al paciente, y  $K_{DIA}$  es una constante que representa el DIA (duración de la acción de la insulina) de cada persona. La salida de este bloque es la IOB estimada. Se define una ley de conmutación a partir de la IOB estimada con el objetivo de modificar la referencia del controlador cuando se supera el valor  $\overline{IOB}$ . La ley de conmutación propuesta es:

$$\omega(t) = \begin{cases} \bar{\omega} & \text{si } \sigma < 0 \\ \omega^+ & \text{si } \sigma \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma(t) = IOB - \overline{IOB} + \tau(IOB - \overline{IOB}) \quad (3)$$

El término derivativo en  $\sigma(t)$  le permite al SAFE predecir si la restricción está por ser violada. Cuanto mayor es el  $\tau$ , mayor es el peso que se le da a este término de  $\sigma(t)$ .

Cuando la restricción es superada o está por ser superada  $\sigma(t)$  se vuelve positiva, por lo tanto  $\omega(t)$  cambia su valor de 0 a  $\omega^+$ , lo que incrementa la referencia del controlador  $G_d$  y como consecuencia disminuye la salida del controlador. Esto, en la medida que  $\omega^+$  sea suficientemente grande, permite que la IOB vuelva a ser menor que  $\overline{IOB}$ , y por lo tanto que  $\sigma(t)$  se vuelva negativa y que  $\omega(t)$  regrese a ser 0. De esta forma, se genera una conmutación (conocida como Modo Deslizante) hasta que la IOB caiga por debajo de la

restricción sin la asistencia del SAFE. Se agrega un filtro de primer orden para suavizar la señal discontinua generada por la ley de conmutación.

#### Time Enable:

El modo de operación Time Enable utiliza un límite constante en la IOB con el objetivo de lograr una transición suave y automática entre lazo cerrado y lazo abierto.

En este trabajo, el controlador de glucosa principal será el PDBasal (Palerm, 2011), que es un PID clásico donde el término integral fue reemplazado por la insulina basal de la terapia de lazo abierto. La siguiente ecuación describe la salida del controlador:

$$u_c(t) = k_p \left[ e(t) + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right] + u_{basal} \quad (4)$$

$$k_p = \frac{60 ITDD}{\tau_d 1500} \quad (5)$$

Donde ITDD es la dosis total de insulina diaria requerida por el paciente y  $\tau_d$  tiene un valor nominal de 90min en el día y 60min en la noche (Palerm, 2011).

Después de una comida, el controlador funciona de la siguiente manera: primero, cuando se administra el bolo de insulina de lazo abierto, la restricción en la IOB es violada de manera inevitable y por ende, la referencia  $G_{ds}$  aumenta. En este momento, la salida del controlador debería ser 0 o muy cercana a 0 ya que la referencia del controlador toma un valor muy alto. Esto quiere decir que no habrá suministro de insulina adicional y el sistema operará en lazo abierto. La IOB decrece naturalmente a medida que la insulina es absorbida de acuerdo al DIA de cada paciente. Cuando la IOB alcanza el valor  $\overline{IOB}$  (el tiempo que tarda la IOB en hacer esto se llamará  $T_{OL}$ ),  $\sigma(t)$  se vuelve negativa, lo que provoca nuevamente una reducción de la referencia  $G_{ds}$ . De esta forma se le permite al controlador entregar insulina al paciente. Si la respuesta del controlador es demasiado agresiva, la restricción será violada nuevamente, generando una conmutación entre 0 y  $\omega^+$  (la duración de este proceso se lo llamará  $T_{SAFE}$ ). Este comportamiento se mantendrá hasta que la respuesta del controlador deje de causar que la IOB supere a  $\overline{IOB}$ . Una vez superado este punto, el controlador tendrá la libertad de actuar libremente sin la interferencia de la capa de seguridad ( $T_{CL}$ ).

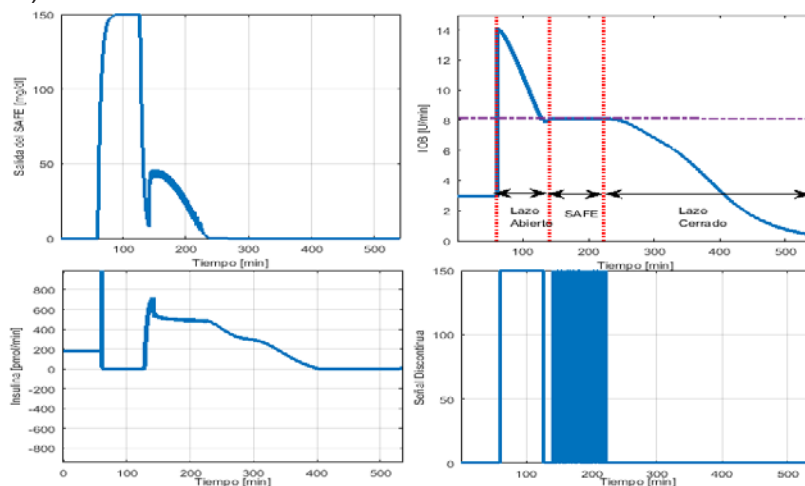


Figura 2

La figura 2 ilustra el funcionamiento del algoritmo en el paciente Adulto 10 del simulador UVA/Padova cuando éste ingiere una comida de 80g de carbohidratos. La comida comienza en  $t=60$ min. En este momento se administra el bolo de insulina de lazo abierto, lo que provoca que la IOB alcance su valor máximo de forma prácticamente instantánea. Como el límite  $\overline{IOB}$  es superado, la señal  $\omega(t)$  toma el valor  $\omega^+$  y lo mantiene por todo el  $T_{OL}$ .

Esto fuerza al controlador a no entregar insulina extra, y por lo tanto también se corta el suministro de insulina basal. Luego, en  $t=140\text{min}$ , se alcanza el valor  $\overline{IOB}$  provocando la conmutación entre  $0$  y  $\omega^+$ , y así permitiendo que el controlador entregue insulina de manera gradual sin exceder la restricción. En  $t=220\text{min}$  aproximadamente, el  $T_{\text{SAFE}}$  termina y se deja que el controlador actúe libremente.

Este método provee una manera práctica de establecer un criterio temporal para la transición entre lazo abierto y lazo cerrado. El  $T_{\text{OL}}$  se puede ajustar variando el  $\overline{IOB}$  (Cuanto más alto sea  $\overline{IOB}$ , menor será el  $T_{\text{OL}}$  y viceversa), y el  $T_{\text{SAFE}}$  se puede modificar variando la ganancia del controlador. El Time Enable también presenta la ventaja de funcionar como un mecanismo "Bumpless" ya que permite que la transición entre ambas terapias (LA y LC) sea gradual. Esto significa que se evitarán altos y transitorios indeseados en la infusión de insulina del controlador.

Las bombas de insulina consideran una relación lineal entre la IOB y el tiempo en vez del modelo más complejo de la ecuación (1). Haciendo esta suposición, se puede establecer una relación entre el  $T_{\text{OL}}$  y el valor  $\overline{IOB}$  dada por la siguiente ecuación:

$$\overline{IOB} = \left(1 - \frac{T_{\text{OL}}}{\text{DIA}}\right) \cdot I:\text{CHO} \cdot [\text{CHO}] \quad (6)$$

donde  $I:\text{CHO}$   $[\text{CHO}]$  representa el bolo de insulina ( $I:\text{CHO}$  es la relación insulina carbohidratos del paciente y  $[\text{CHO}]$  es la cantidad de carbohidratos ingeridos).

#### Amplitude Enable:

El modo de operación Amplitude Enable está diseñado para ser utilizado con controladores completamente automáticos, es decir, sin anuncio de corridas al controlador y sin bolo ni basal de lazo abierto. Aquí se utiliza un factor del perfil de IOB que resultaría de la terapia de lazo abierto como restricción en la IOB. Como el Amplitude Enable está pensado para ser utilizado en ensayos clínicos, por lo tanto la composición y el horario de las comidas se conocen de antemano. De esta forma, el perfil de IOB de lazo abierto puede ser calculado y programado en la bomba de insulina antes de empezar con el ensayo. El controlador principal que se utilizará para ilustrar el funcionamiento del Amplitude Enable y para todas las simulaciones, será un PID clásico, cuya ecuación es:

$$u_c(t) = k_p \left[ e(t) + \tau_d \frac{de(t)}{dt} + \int \frac{1}{\tau_i} e(t) dt \right] \quad (7)$$

Donde  $\tau_i$  tiene un valor nominal de 450min durante el día y 150min durante la noche (Palerm, 2011).

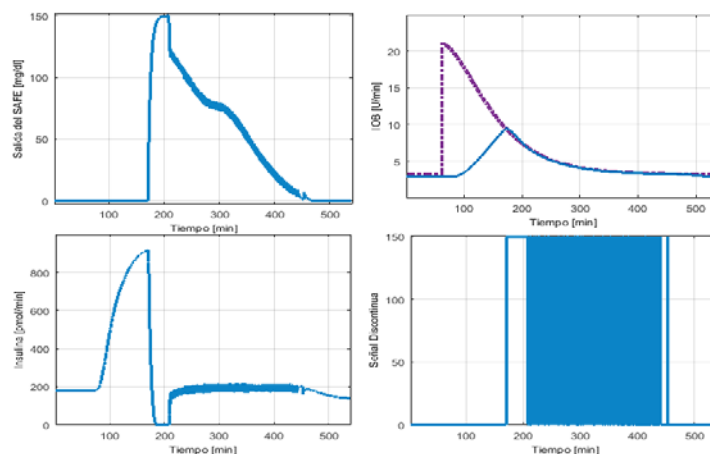


Figura 3



El objetivo de utilizar el perfil de IOB de lazo abierto como restricción es poder asegurar que la cantidad de insulina administrada por el controlador no sea muy superior a lo que resultaría con la terapia de lazo abierto. Si el controlador muestra un buen desempeño, la restricción puede ser relajada (es decir, fijada a un factor mayor del perfil de IOB de lazo abierto).

Este método funciona de la siguiente forma: después de una comida, el nivel de glucosa y, por lo tanto, la entrada del controlador aumentan rápidamente. Luego, el controlador administra una cantidad de insulina elevada hasta que la IOB se encuentra con el  $\overline{IOB}$ . En este punto, comienza la conmutación entre 0 y  $w_+$  con el fin de que la acción del controlador no cause que la restricción sea violada. La figura 3 muestra este comportamiento en el paciente 10 del simulador UVA/Padova cuando éste ingiere una comida de 80g de carbohidratos. Aquí se puede observar que luego de ingerir una comida, el controlador comienza a responder lentamente y aumenta la IOB hasta que se alcanza el límite establecido ( $\overline{IOB}$ , que se muestra en la figura con línea punteada) en  $t=160\text{min}$ . Eso provoca que el SAFE corte el suministro de insulina del controlador hasta  $t=220\text{min}$ , donde se vuelve a alcanzar a  $\overline{IOB}$  (notar que la IOB decrece más rápido que en lazo abierto por la falta de insulina basal). En este momento, comienza la conmutación entre 0 y  $w_+$  hasta aproximadamente  $t=470\text{min}$ .

Se puede observar que a diferencia del Time Enable, en este modo de operación la conmutación existe en el período postprandial tardío en vez del postprandial temprano. Esto significa que la compensación de la comida la realiza el mismo controlador, cuando en el Time Enable esto lo hacía el bolo de insulina de lazo abierto. Cabe destacar que este lazo de seguridad permite que el controlador sea más agresivo en el período postprandial temprano sin arriesgarse a que se produzca una infusión de insulina excesiva en el período postprandial tardío.

#### Simulaciones y Resultados:

El escenario de simulación consistió en 3 comidas con un total de 200g de carbohidratos en un período de 25hs (40g, 80g y 80g respectivamente). Las pruebas se realizaron en un solo paciente (el adulto 10 del simulador UVA/Padova) con fines ilustrativos. Los parámetros del SAFE se establecieron en  $w_+=150\text{mg/dl}$ ,  $t=1\text{min}$ , y la frecuencia de corte del filtro en  $4\pi/60\text{ rad/s}$ . Ver (Revertet *et al.*, 2013) para más detalles.

Para ilustrar el funcionamiento del Time Enable, se realizaron dos sets de simulaciones. Primero, la ganancia  $K_p$  del controlador se fijó en su valor nominal y  $\overline{IOB}$  se varió desde 3 U hasta 9 U de insulina con un paso de 1 U. En el segundo set de simulaciones, el  $\overline{IOB}$  se fijó a un valor constante de 5 U. Este valor de  $\overline{IOB}$  permite que el  $T_{OL}$  sea aproximadamente 1.5hs después de cada comida. La ganancia del controlador se cambió a -70%, -50%, -30%, -10% y +10% de su valor nominal.

La figura 4 muestra los resultados del primer set de simulaciones (correspondientes a un barrido en  $\overline{IOB}$ ). De aquí se puede observar que los valores más bajos de  $\overline{IOB}$  resultan en los tiempos más largos en lazo abierto. El tercer gráfico de la figura 4 deja en evidencia que al limitar más la IOB, se consigue reducir el riesgo de hipoglucemia como consecuencia de un decremento en la cantidad de insulina administrada al paciente. La figura 5 resume los resultados del segundo set de simulaciones (correspondientes a un barrido de  $K_p$ ). Se puede observar que tanto para un controlador más agresivo ( $K_p$  alto) como para un controlador más restringido ( $\overline{IOB}$  bajo), el  $T_{SAFE}$  aumenta. Esto significa que el paciente estará mejor protegido de una sintonización peligrosa del controlador. De todas formas, tampoco es deseable tener un  $T_{SAFE}$  demasiado prolongado, ya que esto significaría que el controlador está siendo frenado constantemente por la capa de seguridad y no puede actuar libremente para regular la glucemia.

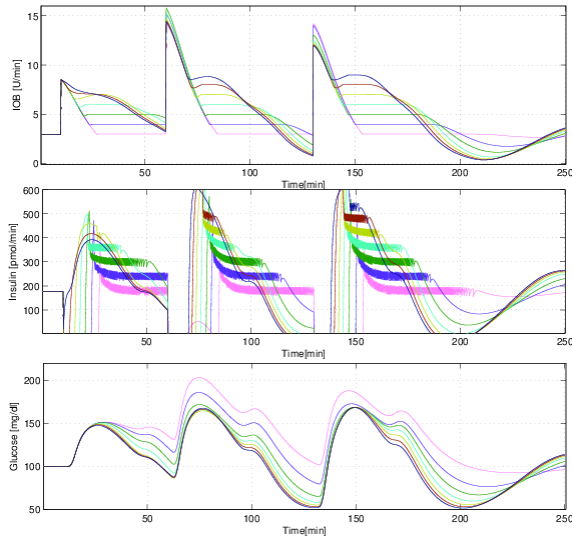


Figura 4

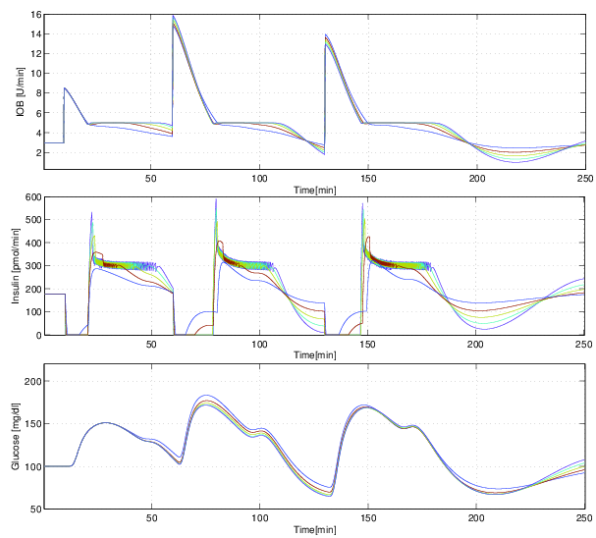


Figura 5

En el caso del Amplitude Enable, el  $\overline{IOB}$  se fijó en un 110% del perfil de IOB de lazo abierto. Se elige un factor de 1.1 en este caso, pero en general siempre mayor que 1, ya que el controlador nunca podrá responder a una perturbación como lo es la ingesta de una comida tan rápida como lo haría el bolo de insulina de lazo abierto. La ganancia del controlador  $K_p$  se sintonizó al 100 %, 200 %, 500% y 7500% de su valor nominal con el objetivo de ilustrar el comportamiento de ambas configuraciones a medida que el controlador se vuelve cada vez más agresivo. La figura 6 muestra la evolución en el tiempo de la IOB, la glucosa e insulina cuando no se utiliza la capa de seguridad. La figura 7 muestra cómo estas variables cambian en el tiempo cuando la capa de seguridad sí es utilizada. Se puede observar que cuando se utiliza la capa SAFE, el riesgo de hipoglucemia se reduce significativamente, incluso cuando se tiene una ganancia desproporcionadamente grande. También se puede ver que este modo de operación le permite al controlador ser más agresivo (y por lo tanto, reducir los episodios de hiperglucemia) sin exponer al paciente a una hipoglucemia severa en el período postprandial tardío.

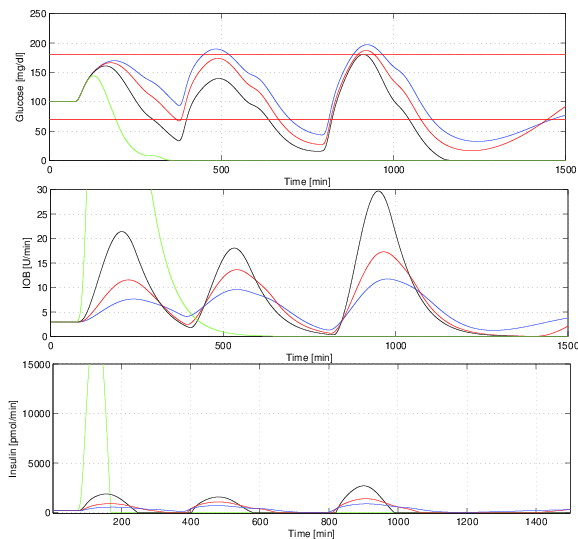


Figura 6

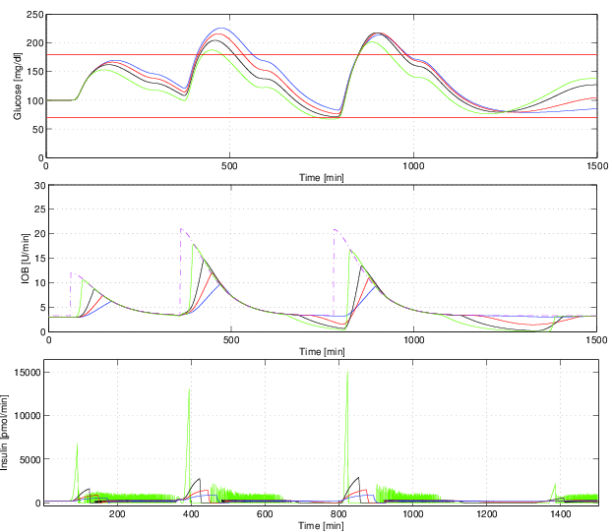


Figura 7

## CONCLUSIONES

Se propusieron dos modos de funcionamiento utilizando la capa de seguridad SAFE para ser utilizados en ensayos clínicos para la validación de algoritmos de control para la regulación de la glucemia. Las simulaciones demostraron que el modo Time Enable permitía

que se establezca un criterio de transición temporal entre lazo abierto y lazo cerrado. La transición se realiza de forma suave, gradual y automática. Adicionalmente, el Time Enable se comporta como un mecanismo “Bumpless” ya que evita saltos y transitorios indeseados cuando se pasa de una terapia a la otra. En el caso del Amplitude Enable, los resultados de las simulaciones mostraron que el paciente fue protegido de episodios de hipoglucemia severos, incluso cuando la ganancia del controlador era desproporcionadamente grande. Esto asegura que se puede probar algoritmos de lazo cerrado de forma segura.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] León-Vargas, F.; Garelli, F.; De Battista, H.; Vehí, J. *Postprandial response improvement via safety layer in closed-loop blood glucose controllers*. Biomedical Signal Processing and Control, 2015.
- [2] Revert, A.; Garelli, F.; Picó, J.; De Battista, H.; Rossetti, P.; Vehí, J.; Bondia, J. *Safety auxiliary feedback element for the artificial pancreas in type 1 diabetes*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2013.
- [3] Palerm, C. C. *Physiologic insulin delivery with insulin feedback: A control systems perspective*. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2011.
- [4] Bondia, J.; Vehí, J.; Palerm, C. Herrero, P. *El Páncreas Artificial: Control Automático de Infusión de Insulina en Diabetes Mellitus Tipo 1*. RIAII, 2010.
- [5] Kovatchev, B. P.; Renard, E.; Cobelli, C. *Safety of Outpatient Closed-Loop Control: First Randomized Crossover Trials of a Wearable Artificial Pancreas*. Diabetes Care, 2014
- [6] John Walsh, R. R. *Pumping Insulin: Everything You Need For Success with an Insulin Pump*. Torrey Pines Press, 2013.

## MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE CELDAS SOLARES DE PEROVSKITA CON DIFERENTES MATERIALES COMO CAPA DE TRANSPORTE DE HUECOS

Guillermo A. Casas<sup>1,2</sup>, Marcelo A. Cappelletti<sup>1,3,5</sup>, Ariel P. Cédola<sup>1</sup>,  
Bernabé Marí Soucase<sup>4</sup> y Eitel L. Peltzer y Blanca<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Estudio de Materiales y Dispositivos Electrónicos (GEMyDE),  
Dpto. de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata,  
48 y 116, CC.91, La Plata (1900), Argentina ([guillecasas1958@gmail.com](mailto:guillecasas1958@gmail.com))

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Quilmes, Roque Saenz Peña 352,  
Bernal (1876), Buenos Aires, Argentina

<sup>3</sup> Universidad Nacional Arturo Jauretche, Avenida Calchaquí 6200,  
Florencio Varela (1888), Buenos Aires, Argentina

<sup>4</sup> Department de Física Aplicada-ETSED, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera  
s/n, 46022 València, Spain

<sup>5</sup> Comisión Nacional de Investigaciones Científicas (CONICET)

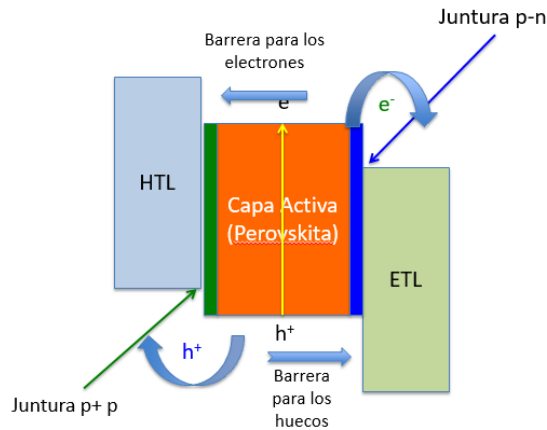
### INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las Celdas Solares basadas en Perovskita (CSP) han tenido un notable incremento en su rendimiento, lo cual alentó fuertemente la investigación experimental y la simulación numérica para optimizar el diseño de la estructura y la selección de los materiales que la componen. El objetivo es mejorar el desempeño de una tecnología que promete obtener altas Eficiencias de Conversión de Energía (*ECE*) con bajos costos de fabricación. Un panorama actual del desarrollo y progreso de las CSP, respecto de la eficiencia, estabilidad, costo y comercialización, ha sido presentado en las referencias [1-2]. En otros estudios, ha sido informada la primera celda solar basada en la estructura  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  como perovskita, con *ECE* de 7.4% [3], mientras que eficiencias en el orden del 20% han sido publicadas en referencia [4]. Recientemente, un nuevo valor record de *ECE* de 22.1% fue desarrollado por KRICT/UNIST [5], confirmando la tendencia en alta de esta tecnología promisoría. Además, en la referencia [5] se puede apreciar que las CSP tienen la mayor pendiente de crecimiento de la *ECE* entre todas las tecnologías existentes.

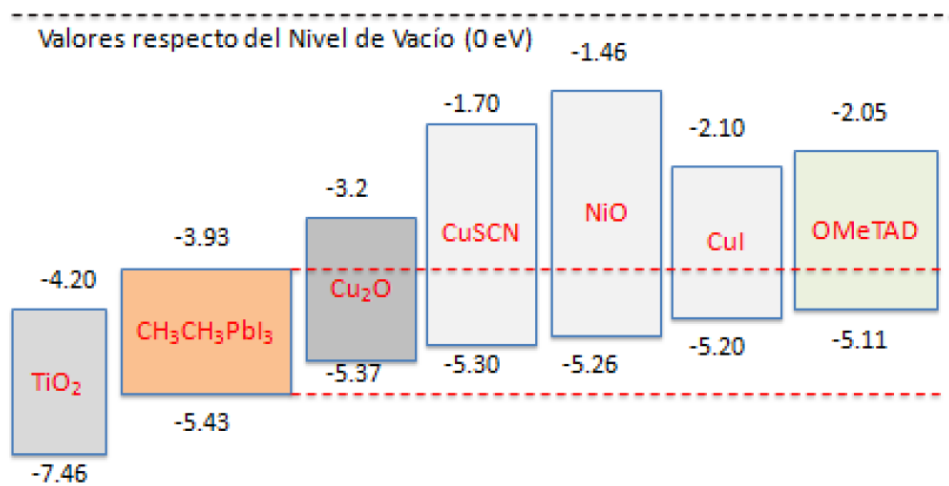
En la figura 1 se muestra la estructura planar de una CSP, donde se aprecia que la luz es absorbida por la región intermedia denominada capa de perovskita, mientras que las otras dos regiones (HTL: Hole-Transporting Layer; and ETL: Electron-Transporting Layer) son las que vinculan la zona de generación de portadores con los contactos externos. A los efectos de una eficiente colección de los portadores en los contactos, la capa ETL debe bloquear el flujo de huecos y facilitar el de electrones, mientras que la capa HTL bloquea los electrones y transporta los huecos hacia el terminal, como esquemáticamente se indica en la figura 1.

En este trabajo, se presenta un estudio comparativo, por medio de simulaciones numéricas, de los efectos de utilizar diferentes materiales inorgánicos como capa HTL, tales como  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuSCN}$ ,  $\text{NiO}$  y  $\text{CuI}$ , y compararlos con el material más comúnmente utilizado como el spiro-OMeTAD, el cual es relativamente costoso. Todos ellos son aptos para funcionar como transportadores de huecos y bloqueadores de electrones [6, 7].

En la figura 2 se ilustran los valores típicos de energía en electrón volts (eV) del Mínimo de la Banda de Conducción (MBC) y del Máximo de la Banda de Valencia (MBV), respecto del nivel de vacío, de los materiales utilizados en la simulación. El ancho de la banda prohibida ( $E_g$ ) es la diferencia en energía entre estos dos valores. La afinidad electrónica ( $\chi_e$ ) es la diferencia de Energía entre el MBC y el nivel de vacío (referencia). Además, el nivel de offset es referido como la diferencia entre el MBV de las capas HTL y de perovskita ( $\text{Offset} = \text{MBV}_{\text{HTL}} - \text{MBV}_{\text{Perovskita}}$ ).



**Figura 1.** Estructura de una celda solar basada en perovskita.



**Figura 2.** Energías de los bordes de las bandas de Conducción y Valencia para las capas de Perovskita, ETL y HTL referidos al nivel de vacío.

## DETALLES DE LA SIMULACIÓN

La simulación numérica es una herramienta importante para investigar en forma sistemática y con gran flexibilidad el impacto de la geometría de la celda y los materiales utilizados, obteniendo un aporte insustituible para su diseño. En este trabajo, el análisis mediante simulaciones numéricas de una CSP ha sido llevado a cabo a través del código de simulación de celdas en una dimensión SCAPS-1D (Solar Cells Capacitance Simulator), desarrollado por la Universidad de Gent, y disponible para la comunidad científica [8]. Este código resuelve las tres ecuaciones diferenciales acopladas (Poisson, continuidad para huecos y electrones). La celda base estudiada es una estructura n-p-p planar de tres capas, la cual ha sido desarrollada en este trabajo como ETL (TiO<sub>2</sub>) –Perovskita (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub>) - HTL (variable). Los materiales spiro-OMeTAD, Cu<sub>2</sub>O, CuSCN, NiO y CuI son usados separadamente como capa HTL para comparar la eficiencia del dispositivo. La radiación solar ingresa por la capa ETL y ha sido utilizado el espectro solar estándar AM1.5G (1000 W/m<sup>2</sup>; T =300°K). La Tabla 1 resume los parámetros físicos empleados para la capa HTL, donde  $N_C$  y  $N_V$  son las densidades efectivas de estado (DOS) en las bandas de conducción y de valencia, respectivamente;  $\mu_n$  y  $\mu_p$  son las movilidades de electrones y huecos, respectivamente;  $\epsilon$  es la permitividad relativa; y  $N_A$  y  $N_D$  son las concentraciones de portadores aceptores y donoras, respectivamente. Estos valores fueron extraídos de la literatura [9-16]. Las dimensiones de cada capa fueron fijadas en los valores típicos [9,11], En particular el ancho de la perovskita en 400 nm garantiza una absorción de radiación

cercana a la máxima, sin pérdidas mayores por recombinación. Los coeficientes de absorción de  $\text{TiO}_2$ , de la perovskita y de los materiales spiro-OMeTAD,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuSCN}$  y  $\text{NiO}$  fueron extraídos de las referencias [17-21]. En el caso de  $\text{CuI}$  se ha aproximado el coeficiente de absorción como constante e igual a  $1.00 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$  hasta la longitud de onda correspondiente al  $E_g$  del material.

**Tabla 1.** Parámetros físicos utilizados en las simulaciones para la capa HTL.

	$\text{Cu}_2\text{O}$	$\text{CuSCN}$	$\text{NiO}$	$\text{CuI}$	spiro-OMeTAD
$E_g$ (eV)	2.17	3.6	3.8	3.1	3.06
$\chi_e$ (eV)	3.2	1.7	1.46	2.1	2.2
$N_C$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.50 \times 10^{20}$	$2.50 \times 10^{20}$	$2.50 \times 10^{20}$	$2.50 \times 10^{20}$	$2.50 \times 10^{20}$
$N_V$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2.50 \times 10^{20}$	$2.50 \times 10^{20}$	$2.50 \times 10^{20}$	$2.50 \times 10^{20}$	$2.50 \times 10^{20}$
HTL (400 nm) $\mu_n$ ( $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	80	25	2.8	44	$2.00 \times 10^{-4}$
$\mu_p$ ( $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	80	25	2.8	44	$2.00 \times 10^{-4}$
$E$	6.6	5.1	11.7	6.5	3.0
$N_A$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$3.00 \times 10^{18}$	$3.00 \times 10^{18}$	$3.00 \times 10^{18}$	$3.00 \times 10^{18}$	$3.00 \times 10^{18}$
$N_D$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	0	0	0	0	0
Offset (eV)	0.06	0.13	0.17	0.23	0.32

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se resumen los resultados de la ECE calculada variando el material de la capa HTL, y manteniendo fijas las otras dos capas. Se puede observar que la ECE decrece cuando el nivel de offset aumenta. En el caso de spiro-OMeTAD, estos resultados coinciden muy bien con valores experimentales extraídos de [4]. La última columna de la Tabla 2 corresponde a los valores de ECE que se obtendrían si el offset fuese nulo. Puede apreciarse en ese caso que sólo el spiro-OMeTAD presenta un rendimiento inferior en esa condición. Esto se debe a la baja movilidad relativa de los huecos en este material.

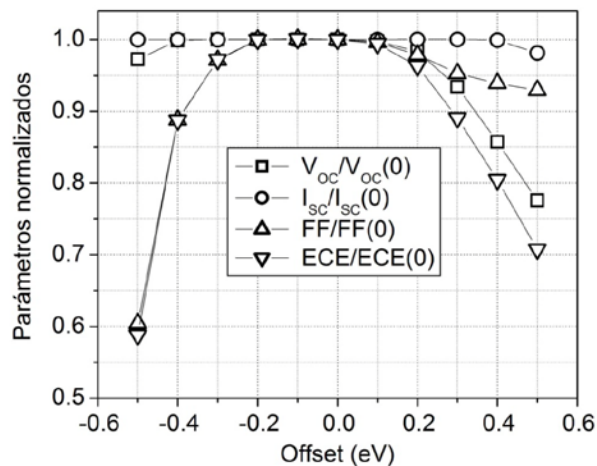
**Tabla 2.** Eficiencia de la celda solar para cada HTL según parámetros de la Tabla 1. La última columna, ECE a Offset 0, corresponde a los resultados de la simulación ajustando la afinidad electrónica de cada material para alinear las bandas de valencia del mismo y de la perovskita.

HTL	Offset (eV)	ECE (%)	ECE (%) a Offset = 0
$\text{Cu}_2\text{O}$	0.06	25.06	25.10
$\text{CuSCN}$	0.13	24.86	25.11
$\text{NiO}$	0.17	24.57	25.11
$\text{CuI}$	0.23	23.78	25.11
spiro-OMeTAD	0.32	21.79	23.63

Como las movilidades en los otros materiales van desde un mínimo de  $2.8 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  en el caso del  $\text{NiO}$ , a un máximo de  $80 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  en el  $\text{Cu}_2\text{O}$  (una relación de 1 a 30) sin modificar la ECE, se puede suponer que la movilidad es un factor importante hasta cierto valor mínimo a partir del cual su incidencia es prácticamente nula.



La figura 3 muestra los datos obtenidos de las simulaciones de la degradación de los parámetros eléctricos: tensión de circuito abierto  $V_{OC}$ , corriente de corto circuito  $I_{SC}$ , factor de llenado  $FF$  y  $ECE$ , como una función del nivel de offset para la celda solar de estructura  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Perovskite}/\text{TiO}_2$ . Los valores presentados están normalizados a aquellos correspondientes al nivel de offset igual a cero, los cuales son 1.22 V, 23.64 mA, 86.79 % y 25.10 %, para  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $FF$  y  $ECE$ , respectivamente. Los valores de offset positivos indican que el MBV de la capa HTL está por encima del MBV de la capa de perovskita, tal como es el caso de los materiales considerados en este trabajo. Bajo esta condición, la disminución de  $V_{OC}$  es la principal razón para la degradación de la  $ECE$ . Este comportamiento pareciera ser contradictorio, dado que un offset positivo debería significar un campo eléctrico que contribuya al flujo de huecos desde la perovskita hacia la capa HTL.

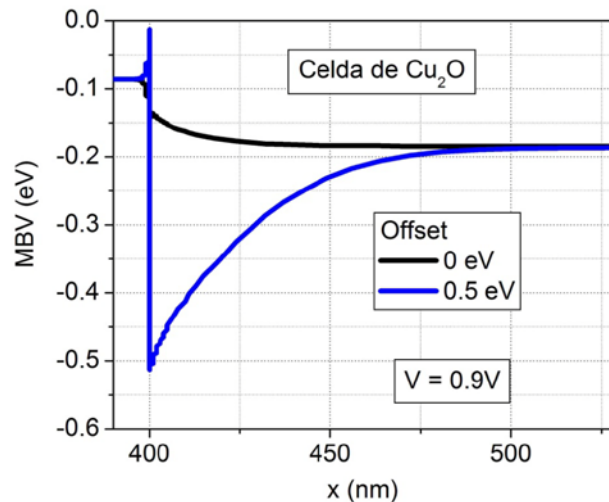


**Figura 3.** Parámetros normalizados como una función del nivel de offset entre el MBV de las capas HTL y de perovskita para la celda solar de estructura  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Perovskita}/\text{TiO}_2$ .

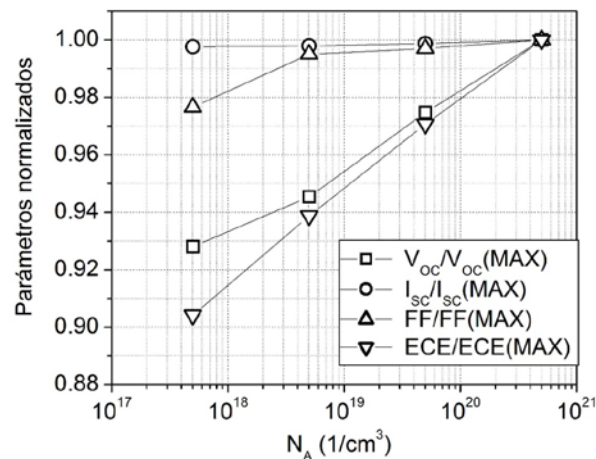
Para un dado nivel de offset, el valor de  $ECE$  se incrementa cuando la  $N_A$  en la perovskita aumenta. De esta manera, un valor máximo de  $ECE$  en el orden de 28% ha sido obtenido para  $N_A = 5.00 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , para el nivel de offset igual a cero. En la figura 4 ha sido graficado el MBV en la interface HTL/perovskita como una función de la distancia desde el frente, para dos niveles diferentes de offset (0 y 0.5 eV). Se asume que  $x = 0$  es la ubicación del contacto más cercano a la capa HTL, y por lo tanto,  $x = 400 \text{ nm}$  es la ubicación de la interface HTL/perovskita. Para un nivel de offset igual a 0.5 eV, puede observarse que en  $x = 400 \text{ nm}$  se tiene una barrera de potencial que dificulta el movimiento de huecos desde la perovskita hacia la capa HTL.

Los resultados obtenidos de las simulaciones sugieren que la altura de la barrera de potencial no depende únicamente del nivel de offset, sino también del nivel de dopado en la capa de perovskita. Por otro lado, en el caso de offset negativos ( $MBV_{HTL} - MBV_{Perovskita} < 0$ ), la barrera de potencial dificulta la extracción de huecos generados en la capa de perovskita y el valor de  $ECE$  disminuye rápidamente debido a la reducción de  $FF$  (Figura 3).

En la figura 5 se pueden observar los parámetros eléctricos ( $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $FF$  y  $PCE$ ) como una función de la concentración de impurezas aceptoras en la capa de perovskita, para la celda solar de estructura  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Perovskita}/\text{TiO}_2$ . Los valores presentados están normalizados a aquellos correspondientes a los valores máximos, los cuales son 1.32 V, 23.69 mA, 89.74 % y 28.07 %, para  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $FF$  y  $ECE$ , respectivamente.



**Figura 4.** Máximo de la Banda de Valencia como una función de la distancia desde el frente en la interface HTL/perovskita para la celda solar de estructura  $\text{Cu}_2\text{O}$ /Perovskita/ $\text{TiO}_2$ .



**Figure 5.** Parámetros normalizados como una función de la concentración de impurezas aceptoras en la capa de perovskita para la celda solar de estructura  $\text{Cu}_2\text{O}$ /Perovskita/ $\text{TiO}_2$ .

Además, en el caso de celdas solares de estructura  $\text{Cu}_2\text{O}$ /Perovskita/ $\text{TiO}_2$ , valores bajos de movilidades de huecos en la capa HTL (por debajo de  $3 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) disminuye el parámetro *ECE* hasta un 10% cuando esta región es considerada intrínseca ( $N_A = 0$ ) o levemente dopada. A partir de los datos presentados en la Tabla 1, la movilidad de huecos para el spiro-OMeTAD está claramente por debajo de  $3 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ . En cambio, las movilidades de huecos para  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuSCN}$  y  $\text{CuI}$  están bien por encima de este valor, mientras que para  $\text{NiO}$  es cercano a  $3 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ , donde la degradación del *ECE* es aún despreciable.

## CONCLUSIONES

El comportamiento de las CSP con estructuras p-p-n ha sido estudiado a través de simulación computacional utilizando cinco diferentes materiales inorgánicos como capa HTL (Hole-Transporting Layer). Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que la eficiencia de estos dispositivos puede ser aún mejorada con respecto a los prototipos reportados en la literatura, las cuales tienen eficiencias del orden del 20% cuando la capa HTL es spiro OMeTAD. Se ha encontrado que el efecto más decisivo sobre el *ECE* es la barrera de potencial que se forma en la interface HTL/perovskita. El alineamiento entre los MBV entre las capas HTL y la perovskita es un factor clave para reducir la altura de la

barrera de potencial. Otro factor importante es el nivel de dopado en la región tipo p de la perovskita. Para el máximo valor de  $N_A$  considerado en este trabajo ( $5.00 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ), eficiencias en el orden del 28% han sido obtenidas para la celda solar de estructura  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Perovskita}/\text{TiO}_2$ . También las movilidades de huecos en la capa HTL juegan un rol fundamental hasta un cierto valor mínimo (cerca de  $3 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) por debajo del cual el valor del  $ECE$  es reducido. Las movilidades de huecos para  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuSCN}$  y  $\text{CuI}$  son mayores que el valor mínimo, para  $\text{NiO}$  coincide con este valor, mientras que para spiro-OMeTAD está claramente por debajo del valor mínimo. Dado que el material más comúnmente utilizado hoy en día como capa HTL es el spiro-OMeTAD, resultados obtenidos en este trabajo muestran que este material puede ser reemplazado para mejorar la eficiencia.

## REFERENCIAS

- [1] M. Green et al., "The Emergence of Perovskite Solar Cells", *Nature Photonics* 8 (2014) 506-514.
- [2] C. Zuo et al., "Advances in Perovskite Solar Cells", *Adv. Science* (2016) 1500324 (16pp).
- [3] S. Sun et al., "The origin of high efficiency in low-temperature solution-processable bilayer organometal halide hybrid solar cells", *Energy Environ. Sci.* 7 (2014) 399-407.
- [4] M. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E. Dunlop, "Solar cell efficiency tables (version 47)", *Progress in Photovoltaics: Research and Appl.* 24 (2016) 3-11.
- [5] National Renewable Energy Laboratory (NREL) Efficiency Chart. [http://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency_chart.jpg) (Rev. February 12, 2016).
- [6] S. Chatterjee, A. Pal, "Introducing  $\text{Cu}_2\text{O}$  thin films as a Hole-Transport Layer in efficient planar perovskite solar cell structures", *J. Phys. Chem. C* 120 (2016) 1428-1437.
- [7] S. Ye et al., " $\text{CuSCN}$ -based inverted planar perovskite solar cell with an average PCE of 15.6", *Nano Lett.* 15 (2015) 3723-3728.
- [8] M. Burgelman et al., "Modelling polycrystalline semiconductor solar cells", *T. Solid Films* 361 (2000) 527-532.
- [9] L. Feng et al., "Numerical simulation: Toward the design of high-efficiency planar perovskite solar cells", *Applied Physics Letters* 104 (2014) 253508 (4pp).
- [10] L. Peng et al., "Device simulation of solid-state perovskite solar cells", 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2015).
- [11] K. Adhikari, S. Gurung, B. Bhattarai, B. Soucase, "Comparative study on  $\text{MAPbI}_3$  based solar cells using different electron transporting materials", *Phys. Status Solidi C* (2015) 1-5.
- [12] D. Stranks et al., "Electron-Hole diffusion lengths exceeding 1 micrometer in an organometal trihalide perovskite absorber", *Science* 342 (2013) 341-345.
- [13] J. Noh et al., "Chemical management for colorful, efficient, and stable inorganic-organic hybrid nanostructured solar cells", *Nano Letters* 13 (2013) 1764-1769.
- [14] H. Snaith, M. Gratzel, "Electron and Hole Transport through mesoporous  $\text{TiO}_2$  infiltrated with Spiro-MeOTAD", *Adv. Mater.* 19 (2007) 3643-3647.
- [15] M. Lee et al., "Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites", *Science* 338 (2102) 643-647.
- [16] M. Hirasawa, T. Ishihara, T. Goto, K. Uchida, M. Miura, "Magnetoabsorption of the lowest exciton in perovskite-type compound  $(\text{CH}_3\text{NH}_3)\text{PbI}_3$ ", *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 201 (1994) 427-430.
- [17] Q. Deng et al., "Remarkable optical red shift and extremely high optical absorption coefficient of V-Ga co-doped  $\text{TiO}_2$ ", *J. Appl. Phys.* 112 (2012) 013523 (8pp).
- [18] D. Poplavskyy, J. Nelson, "Nondispersive hole transport in amorphous films of methoxy-spirofluorene-arylamine organic compound", *J. Appl. Phys.* 93 (2003) 341-346.
- [19] C. Malerba et al., "Absorption coefficient of bulk and thin film  $\text{Cu}_2\text{O}$ ", *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95 (2011) 2848-2854.
- [20] P. Ahirrao, S. Gosavi, S. Sonawane, R. Patil, "Wide band gap nanocrystalline  $\text{CuSCN}$  thin films deposited by modified chemical method", *Archives of Physics Reserchs. Scholars Reserchs Library* 2 (2011) 29-33.

[21] S. Sriram, A. Thayumanavan, "Structural, optical and electrical properties of NiO thin films prepared by low cost spray pyrolysis technique", *Internat. Journal of Materials Science and Engineering* 1 (2013) 118-121.

## IMPLEMENTACIÓN EN ARGENTINA DEL ENSAYO DE ARCO ELÉCTRICO SOBRE INDUMENTARIA DE PROTECCIÓN

Arrojo, Carlos D., Dias, Ricardo, Scaramutti, José C., Nastta, Hernán A.

UIDET -LEME- Ensayos y Mediciones Eléctricas  
Depto. de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería (UNLP)  
Calle 49 y 116 - (1900) La Plata, Bs. As.  
leme@ing.unlp.edu.ar

### 1. INTRODUCCIÓN

Entre los numerosos riesgos a los que se ven sometidos los trabajadores que desarrollan actividades con equipos eléctricos, se encuentra la exposición a arcos eléctricos; en particular los que pueden originarse por cortocircuitos inesperados en algún punto de la instalación.

Si bien son conocidos los recaudos que deben tomarse en un sistema eléctrico, para evitar que se produzcan contingencias que den lugar a que un operador quede expuesto a un arco eléctrico, la realidad muestra que tal hecho se da en muchas oportunidades, sea por accidente, negligencia o por la falla de alguno de los equipos involucrados. Vale la pena remarcar, que la consideración anterior supone, por supuesto, que todo el personal que desarrolla tareas en ese tipo de entornos, de por sí riesgosos, posee capacitación y entrenamiento adecuados.

La falla de un equipo eléctrico en servicio va, en general, acompañada de un arco (p. e. la falla del aislamiento), pero otros hechos, como la caída de una herramienta sobre barras a distinto potencial, también puede generar un arco eléctrico. El producto de ese arco puede ser expedido hacia el lugar donde se encuentra el operario, por lo cual es necesario que el mismo se encuentre protegido con indumentaria adecuada.

Los posibles efectos que pueden acompañar a un arco eléctrico son múltiples: térmicos (con eventual desprendimiento de partículas de metal incandescente), sonoros, emisión de rayos ultravioletas, presión, etc., si consideramos sólo los de naturaleza física, sin pretender abarcar otros, no menos importantes, como pueden ser los psicológicos. En este punto, vale la pena remarcar, que en el alcance de este artículo, estarán contempladas casi exclusivamente las consecuencias térmicas del mismo.

En un arco eléctrico se pueden alcanzar temperaturas superiores a los 5.000 °C, y durante su formación, parte del metal de los electrodos se evapora e ioniza; el aumento de la corriente origina a su vez un aumento de temperatura, que conduce a la formación de un plasma entre los electrodos. [1]

Entonces, entre los elementos que deberán contribuir más radicalmente a morigerar las consecuencias de un arco eléctrico sobre las personas, se destaca sin duda la ropa que vistan en el momento en que ocurra la contingencia o, utilizando una terminología más continente, todos los Elementos de Protección Personal (EPP) que posea en ese instante.

Es esencial tomar conciencia de la gran importancia que tiene que toda persona que efectúe tareas de montaje, mantenimiento, reparación u operación de equipamiento e instalaciones eléctricas de potencia considerable, disponga de la indumentaria adecuada, la que deberá estar cuidadosamente elegida y probada. El conjunto de propiedades y requerimientos que deben cumplir estos elementos de protección personal, y los correspondientes métodos de ensayo, deberán estar definidos en cada caso; en particular, tendrán que especificarse claramente qué ensayos son necesarios para garantizar el correspondiente nivel de

protección, para indumentaria que deba ser utilizada en zonas con riesgo de exposición a un arco eléctrico. [2]

Así, para cada instalación potencialmente riesgosa, es menester evaluar las condiciones locales en relación con la generación de posibles arcos eléctricos. En particular, se debe evaluar la potencial energía liberada y su incidencia sobre las personas en las inmediaciones. La energía del arco queda determinada fundamentalmente por las características puntuales de la instalación, y está definida por la potencia del mismo y su duración. Sin embargo, sólo parte de esta energía incide sobre las personas que se hallan en las cercanías, actuando como factor de atenuación la distancia que los separe. Por otra parte, tampoco toda esta energía incidente es transmitida al cuerpo de tales personas, siendo aquí los atenuantes, las prendas o elementos con los que se hallen protegidas.

Existe, tanto a nivel nacional como internacional, abundante normativa que contempla el ensayo de materiales o indumentaria a ser utilizada ante riesgo de exposición al arco eléctrico. Como regla general, coinciden en establecer un arco eléctrico de una dada energía, colocando una muestra de tela o la propia indumentaria a una cierta distancia del mismo, con la idea de evaluar el posible daño que podría ocasionarse al usuario. En todos los casos se evalúa cualitativa o cuantitativamente el comportamiento de los elementos de protección, siguiendo distintos métodos y procedimientos, obteniéndose resultados no siempre comparables. En lo que sigue, se describirá entonces en primer término la normativa actualmente vigente en Argentina, y la implementación del ensayo correspondiente en el Laboratorio de Potencia del LEME; a posteriori, se efectuará un breve análisis comparativo de la principal normativa actualmente vigente a nivel internacional, y su posible puesta en práctica en nuestro país.

## 2. ENSAYO SEGÚN NORMA IRAM 3904/2004

La normativa sobre indumentaria de protección actualmente vigente en nuestro país, que define los requisitos y métodos de ensayo para materiales y prendas utilizados ante riesgo de exposición al arco eléctrico, es la IRAM 3904/2004[3]. La misma, está basada en las normas UNE-ENV 50354/2001, española [4], y BS-ENV 50354/2001, de origen británico [5].

El ensayo consiste básicamente, en exponer a los materiales o prendas en cuestión a un arco eléctrico generado por una corriente entre dos electrodos, montados en una caja de yeso diseñada ad hoc. La configuración de prueba hace que el arco sea expedido solo en una dirección, en la cual se coloca la muestra en ensayo.

La norma IRAM diferencia dos métodos de prueba, uno para materiales (Método 1) y otro para prendas ya confeccionadas (Método 2), proponiendo a su vez, para cada uno de ellos, dos clases: 4 kA (Clase 1) y 7 kA (Clase 2).

El detalle de la caja de yeso en la que se montan los dos electrodos para el ensayo, se muestra en la Figura 1, en tanto que en la Figura 2 puede verse el esquema de la instalación de prueba (en ambos casos las dimensiones están expresadas en mm). Para el caso del ensayo de indumentaria (Método 2), se debe emplear un maniquí de material no inflamable ni metálico, que comprenda solamente la parte del torso, con un contorno del pecho de  $(1020 \pm 20)$  mm. En cuanto a los parámetros que definen las características del arco eléctrico para la prueba, son los que se muestran en la Tabla I.



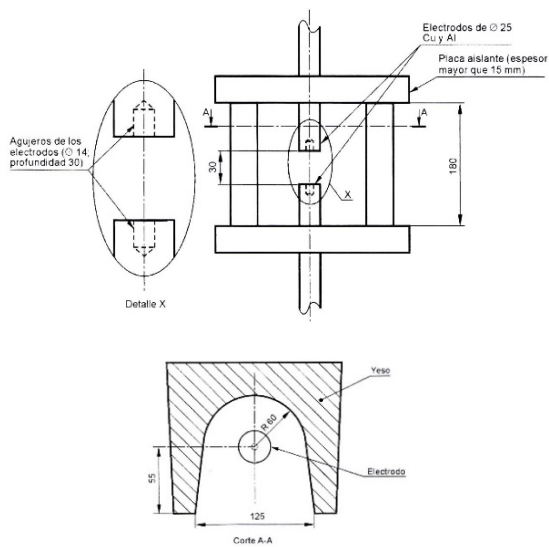


Fig. 1 - Detalle de la caja de ensayo de la norma IRAM 3904/2004 [3]

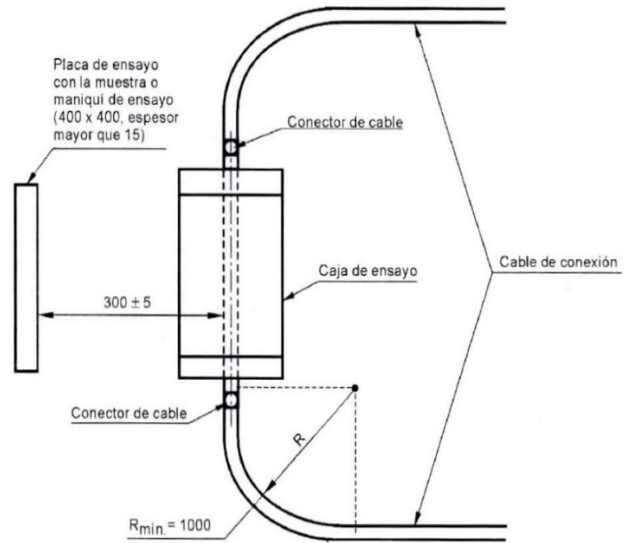


Fig. 2 - Esquema de instalación según norma IRAM 3904/2004 [3]

**Tabla I-** Parámetros característicos del arco eléctrico para el ensayo según norma IRAM 3904/2004 [3]

Tensión de vacío:	400 V c.a. $\pm$ 5 %
Intensidad de la corriente:	Para Clase 1: 4 kA $\pm$ 5 % Para Clase 2: 7 kA $\pm$ 5 %
Duración:	500 ms $\pm$ 0,5 %
Frecuencia:	(50 $\pm$ 0,1) Hz
Factor de potencia:	Debe ser tal que permita que el arco eléctrico no se extinga durante el ensayo
Conector entre electrodos:	Alambre de cobre, con diámetro máximo de 0,5 mm colocado en el interior de los electrodos

La norma prevé que se realicen dos pruebas sobre sendas muestras, que deben ser sometidas previamente a un tratamiento, consistente en lavados según norma IRAM-INTICIT G 7811 [6] o ISO 3175-2 [7], de acuerdo al tipo de material o prenda de que se trate.

El resultado de la prueba se considera satisfactorio cuando se cumplen todos los requisitos siguientes:

- tiempo de persistencia de la llama (si hubiera)  $\leq$  5 s;
- inexistencia de fusión a través del material, excepto los agujeros que se indican en el punto siguiente;
- ausencia de agujeros de más de 5 mm en el material.

En el caso de la prueba de indumentaria (Método 2), se agrega como exigencia, que los elementos de cierre con que eventualmente esté provista la prenda, funcionen adecuadamente después de la exposición al arco.

### 3. IMPLEMENTACIÓN DE LA PRUEBA EN EL LABORATORIO DE POTENCIA DEL LEME

Disponer en nuestro país de la capacidad para efectuar pruebas de materiales o prendas utilizados ante riesgo de exposición al arco eléctrico (*"Arc Flash"*), que de lo contrario deben efectuarse en el exterior (lo que no solo complica administrativamente, sino que además vuelve más onerosa la tarea), entendemos que puede considerarse un aporte significativo al cuidado de la seguridad de las personas que desarrollan actividades en ambientes con este tipo de riesgo.

Las prestaciones del Laboratorio de Potencia del LEME, la implementación de la caja de ensayo que se muestra en la Foto 1, y la instalación cuya vista general se puede observar en la Foto 2, permitieron efectuar las primeras pruebas de materiales, con arcos eléctricos de 4 kA y 7 kA, cumpliendo con los requerimientos impuestos por la norma IRAM 3904/2004 [3].

Los resultados obtenidos durante uno de los ensayos realizados fueron los siguientes:

- Tensión de vacío: 403 V
- Corriente prevista: 7,2 kA
- Duración de la prueba: 499 ms
- Energía de arco (integral en el tiempo del producto tensión-corriente): 395 kJ

En la Figura 3 se muestra el oscilograma con los registros de tensión y corriente obtenidos. La Foto 3 fue extraída del registro de video de la prueba citada, en tanto que la Foto 4 muestra el estado de los electrodos después de producido el arco eléctrico.

### 4. ENSAYOS SEGÚN NORMAS INTERNACIONALES

Las normas internacionales actualmente vigentes más difundidas, relacionadas con los ensayos de indumentaria utilizada ante riesgo de exposición al arco eléctrico, son las de la Comisión Electrotécnica Internacional, IEC Standard 61482-1-1 [8] e IEC Standard 61482-1-2 [9], y la de la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales, ASTM F1959/F1959M [10].

El ensayo descrito en la norma IEC 61482-1-1 [8] se basa en la realización de un "arco abierto", generado entre electrodos con una separación de 300 mm, lo que obliga a utilizar tensiones de prueba de varios kV. Esta norma está basada en una práctica muy utilizada en América del Norte, proponiendo justamente un procedimiento de ensayo prácticamente idéntico al de la norma ASTM F1959/F1959M [10]. Permite, para un dado material, determinar el parámetro conocido como ATPV (*Arc Thermal Performance Value* o Valor de Protección Térmica al Arco), definido como la energía térmica incidente a la que debe ser expuesta la indumentaria, para que exista un 50 % de probabilidad de que el usuario de la misma sufra quemaduras de segundo grado, sin rotura de la prenda. El valor de ATPV es muy utilizado en los Estados Unidos de Norteamérica y Canadá, para clasificar materiales y prendas de protección según diferentes grados de riesgo de exposición a un arco eléctrico en cada lugar de trabajo. [2, 11].

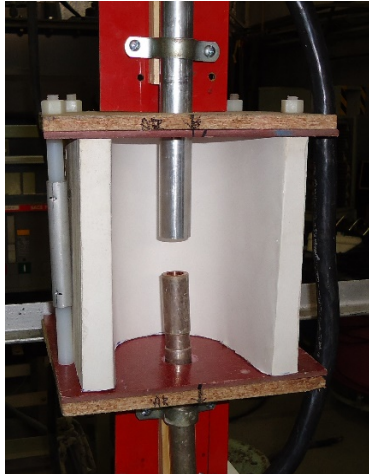


Foto 1 - Caja de ensayo según norma IRAM 3904/04 [3].

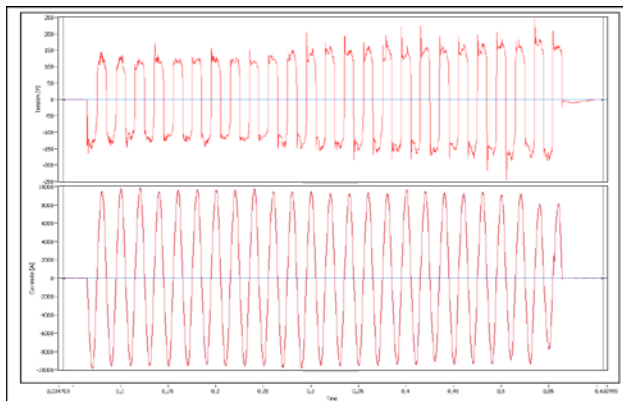


Figura 3 - Oscilograma con los registros de tensión y corriente obtenidos durante un ensayo de arco eléctrico según norma IRAM 3904/2004 [3].



Foto 2 - Instalación de ensayo según norma IRAM 3904/04 [3].



Foto 3 - Imagen extraída del video obtenido durante el ensayo realizado en el LEME.

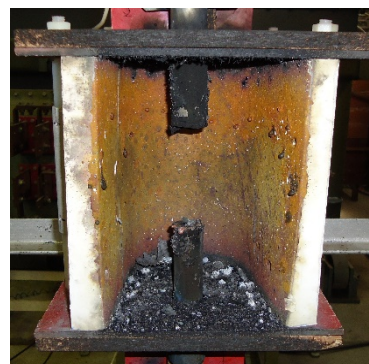


Foto 4 - Estado de los electrodos luego de producido un arco eléctrico.

En cuanto al ensayo contemplado en la norma IEC 61482-1-2 [9], sigue la metodología propuesta por la norma europea que la antecedió, y que ya fuera citada en este artículo, UNE-ENV 50354/2001 [4], generando un “arco confinado” en una caja de yeso (“Box Test”), con dos electrodos separados entre sí 30 mm, sometidos a una tensión de 400 V. Por otra

parte, clasifica también a los materiales y prendas en dos clases, de acuerdo con el valor de la corriente de arco prevista. Como se puede inferir rápidamente, las características del ensayo descrito hasta aquí son completamente análogas a las de la norma nacional IRAM 3904/2004 [3], que también usó a la UNE-ENV 50354/2001 [4] como referencia. Sin embargo, aparece ahora en la norma IEC 61482-1-2 [9], una diferenciación más marcada entre la prueba a que deben ser sometidos los materiales con que se confecciona la indumentaria, y la que debe aplicarse en el caso de que se ensayen prendas ya confeccionadas. Cuando se prueban materiales, se efectúa una evaluación cuantitativa de sus propiedades térmicas de protección contra el arco eléctrico, midiendo la energía transmitida a través de la muestra. El ensayo de exposición al arco eléctrico de las prendas ya confeccionadas, se utiliza en cambio para valorar el comportamiento de todos sus componentes (hilos de las costuras, cierres, botones, etc.), sin efectuar mediciones del calor transferido.

Es oportuno también señalar que, dado que en Europa no es muy utilizada la clasificación en base al ATPV, se halla muy difundida la práctica del ensayo en caja ("*Box Test*"), propuesto por la norma IEC 61482-1-2 [9][2]

Como comentario general, se puede decir que existe un gran consenso internacional, en cuanto a la evaluación cualitativa de los resultados de las pruebas de diferentes materiales a emplearse ante riesgos de exposición al arco eléctrico. Sin embargo, no puede decirse lo mismo respecto de los criterios para una evaluación cuantitativa. La existencia de diversos parámetros de ensayo, hace extremadamente difícil la comparación de los resultados obtenidos para un mismo material, empleando diferentes métodos de prueba. No es raro ver cómo suelen efectuarse comparaciones teniendo en cuenta solamente, por ejemplo, el valor de la corriente de arco "prevista" (8 kA en el ensayo de ATPV y 4 kA ó 7 kA en el ensayo en caja), soslayando considerar otros parámetros sumamente importantes, como pueden ser la distancia entre el material en prueba y el arco eléctrico, la duración del mismo, o el valor verdadero de la corriente durante la ocurrencia del arco, que también definen la energía de ensayo, y por ende, los niveles de protección de un dado material o prenda.[12-15]

A este punto, es conveniente hacer hincapié en que los dos métodos de ensayo previstos actualmente por la IEC, "arco abierto" y "arco confinado", contemplan montajes, configuraciones, tipos de arco eléctrico, parámetros, procedimientos de prueba y requisitos de aprobación muy diferentes; razón por la cual puede afirmarse, que los resultados obtenidos no son físicamente comparables, ni pueden ser transformados unos en otros matemáticamente. La indumentaria de protección debe ser valorada y seleccionada "sólo de acuerdo a uno de los dos métodos", es decir que los mismos no deben combinarse. [1]

En consonancia con lo dicho en el párrafo anterior, la norma IEC 61482-2 [16], que establece los requisitos generales que debe cumplir la indumentaria de protección a utilizar ante riesgo de exposición al arco eléctrico, expresa claramente que, si bien ambos métodos poseen validez reconocida por la Comisión Electrotécnica Internacional para la evaluación de tales elementos, cada uno ellos suministra información diferente no comparable directamente, y deja librada a los usuarios la elección del método de ensayo.

En el caso particular de Argentina, y si bien se haya muy difundida, al menos a nivel comercial, la clasificación en base al ATPV, existe una marcada preferencia hacia la homologación de normativa y procedimientos de ensayo de origen europeos, de lo cual la norma IRAM 3904/2004[3] es una muestra cabal.

Por otra parte, dado que lo que se pretende evaluar son los efectos térmicos del arco eléctrico y, si bien existen diferencias en la forma e intensidad en que el mismo transmite el calor en instalaciones de baja, media o alta tensión, los factores más importantes que lo definen como fuente térmica de energía son su potencia eléctrica y su duración. Así, toda prenda que resista una dada energía incidente, independientemente de la disposición de ensayo con la que se haya generado, tendrá un efecto protector térmico similar contra el arco eléctrico, tanto en una instalación de baja, como de media o alta tensión. [1]



## 5. ESQUEMA DE PRUEBA CON “ARCO ABIERTO” (“ARC RATING TEST”)

La norma IEC 61482-1-1 [8] prevé dos métodos de ensayo denominados A y B. El primero se emplea para cuantificar características de los materiales, como son el Valor de Protección Térmica al Arco (ATPV), o la energía de rotura (*Break Open Energy*,  $E_{BT50}$ ). El método B, en cambio, se utiliza para determinar el comportamiento de las prendas ya confeccionadas (con materiales probados según el método A), incluyendo todos sus componentes (hilos de las costuras, bolsillos, cierres, botones, etc.), pero no prevé la determinación del ATPV por ejemplo.

El ensayo de muestras de material previsto en la norma IEC 61482-1-1 [8] (método A), se basa en la generación de un arco eléctrico en una configuración de tipo coaxial simétrica, colocando tres muestras del material a ensayar, en forma también simétrica. En la Figura 4 se muestra el esquema de prueba extraído de la citada norma (que coincide exactamente con el propuesto en la norma ASTM F1959/F1959M-06ae1 [10]).

La disposición de ensayo consiste en dos electrodos de varilla de acero inoxidable, enfrentados verticalmente a una distancia de 300 mm, entre los cuales se genera el arco eléctrico, y seis barras que forman una configuración coaxial para el retorno de la corriente. Cada una de las tres muestras de material a probar se coloca sobre sendos paneles de soporte, ubicados a 300 mm del eje longitudinal de los electrodos, y desplazados entre sí un ángulo de  $120^\circ$ . Los paneles deben tener como mínimo 550 mm de altura y 200 mm de ancho, y estar provistos de dos calorímetros de cobre electrolítico para determinar la energía incidente. La disposición adoptada permite la formación ininterrumpida del arco eléctrico.

Para lograr una adecuada consistencia estadística se deben efectuar al menos siete “disparos” a una corriente de 8 kA. Por otra parte, teniendo en cuenta que se requiere mantener el arco encendido durante lapsos de hasta 1,5 s, es necesaria una fuente de energía eléctrica de media tensión (varios kV) y gran potencia.

Para el caso del ensayo de indumentaria ya confeccionada (Método B), se propone un montaje similar, pero colocando en lugar de paneles de soporte, maniqués de material no inflamable ni metálico, que incluyan el torso y eventualmente los brazos, con un contorno del pecho de  $(1067 \pm 25)$  mm.

## 6. ESQUEMA DE PRUEBA CON “ARCO CONFINADO” (“BOX TEST”)

Como se anticipó, la metodología de ensayo prevista en la norma IEC 61482-1-2 [9], tiene varios puntos de coincidencia con la norma nacional IRAM 3904/2004 [3], analizada más arriba. Así, prevé dos métodos de prueba, uno para materiales y otro para prendas ya confeccionadas, proponiendo a su vez, para cada uno de ellos, dos clases: 4 kA (Clase 1) y 7 kA (Clase 2). Las dimensiones de la caja de yeso de ensayo y el esquema de la instalación de prueba coinciden, respectivamente, con lo mostrado en las Figuras 1 y 2,

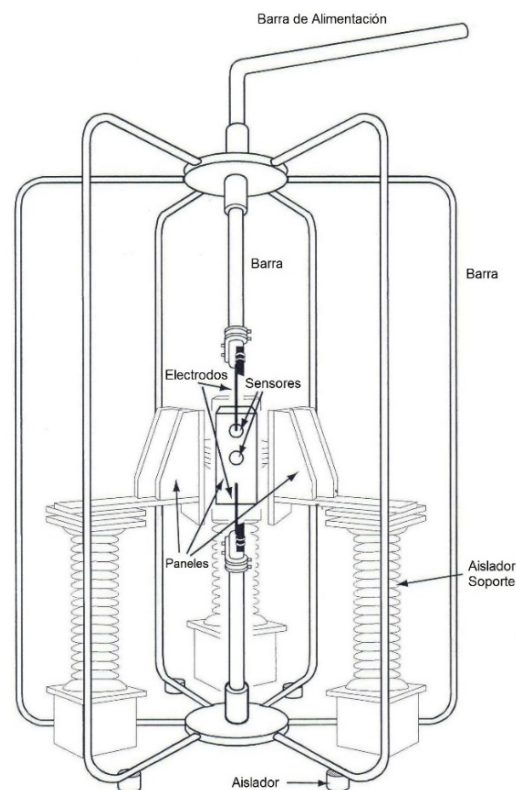


Figura 4 - Esquema de la instalación de ensayo de muestras de material de acuerdo a la norma IEC 61482-1-1 [8]

salvo en la profundidad de los agujeros de los electrodos, y en el espesor de la placa de ensayo, para los cuales la norma IEC especifica 20 mm y > 10 mm, respectivamente. En cuanto a los parámetros que definen las características del arco eléctrico para la prueba, son los ya presentados en la Tabla I.

En el método de ensayo de materiales se requiere medir el calor generado por el arco y la energía transmitida a través de la muestra, utilizando calorímetros de cobre, cuyo incremento de temperatura es directamente proporcional a la energía térmica recibida.

Para el caso del ensayo de las prendas completas en cambio, no se requiere ningún tipo de medición del calor generado, ya que lo que se pretende es evaluar el comportamiento de la indumentaria ya confeccionada, incluyendo todos los elementos que la componen (hilos de las costuras, bolsillos, cierres, botones, etc.).

Para el montaje de las muestras de ensayo se utiliza una placa plana cuadrada de 400 mm de lado y, al menos, 10 mm de espesor, con dos sensores calorimétricos, cuando se prueban materiales, y un maniquí de material no inflamable ni metálico, que comprenda solamente la parte del torso, con un contorno del pecho de  $(1020 \pm 50)$  mm, para el caso de las prendas.

Según se cita en la propia norma, estos ensayos de laboratorio con “arco confinado”, fueron introducidos a fin de evaluar condiciones reales, en las que hay un riesgo significativo de que algún trabajador quede expuesto a un arco eléctrico direccionado hacia su parte frontal, en la zona del esternón.

## 7. CONCLUSIONES

En general, los actores involucrados en temas de seguridad, en particular aquellos que participan asidua o esporádicamente de reuniones de normalización del IRAM, representantes de organismos de certificación, usuarios, fabricantes, importadores, etc., que directa o indirectamente están relacionados con trabajadores que deben utilizar indumentaria de protección para riesgo de exposición al arco eléctrico, suelen manifestarse sobre las ventajas de disponer de laboratorios locales que puedan realizar pruebas de materiales o prendas de este tipo. Así, se decidió en el LEME dedicar los esfuerzos necesarios para estudiar, desarrollar e implementar la realización de tales ensayos, considerando especialmente las prestaciones de su Laboratorio de Potencia. En este contexto, se logró implementar la realización del ensayo de materiales utilizados ante riesgo de exposición al arco eléctrico, cumpliendo con los requerimientos de la norma nacional IRAM 3904-2004 [3].

Por otra parte, después de haber hecho un análisis de buena parte de la normativa internacional vigente actualmente sobre el tema de referencia, se ve que la misma contempla básicamente dos metodologías de prueba típicas: ensayos con “arco confinado” o con “arco abierto”, la primera más difundida en Europa y la segunda de mayor uso en América del Norte. Sin embargo, ambos métodos poseen validez reconocida por la Comisión Electrotécnica Internacional, la que a su vez sostiene que cada uno ellos suministra información diferente, no comparable directamente, y deja librada a los usuarios la elección del método de ensayo.

A este punto, también vale la pena remarcar una significativa evolución que se ha dado en los últimos años en la normativa internacional, en el sentido de haber incorporado a los ensayos en cuestión, evaluaciones de tipo cuantitativas, especialmente orientadas a medir los efectos térmicos del arco sobre la indumentaria y las personas, utilizando, por ejemplo, calorímetros de cobre.

Lo dicho en los párrafos precedentes orienta entonces al LEME a trazar su línea de trabajo futuro sobre el tema, la que estará enfocada, al menos en una primera etapa, a llevar los logros obtenidos en la implementación del método de ensayo de materiales utilizados ante



riesgo de exposición al arco eléctrico con “arco confinado” (“*Box Test*”), hacia la prueba de prendas completas ya confeccionadas bajo la norma nacional, y de materiales y prendas según la norma internacional IEC Standard 61482-1-2 [9], que ya contempla el uso de métodos de evaluación calorimétricos.

## 8. REFERENCIAS

- [1] Asociación Internacional para la Seguridad Social (ISSA), Comité Electricidad, Gas y Agua, “Guía para la selección de equipamiento de protección personal contra los efectos térmicos de un arco eléctrico”, Edición 2011.
- [2] Holger Schau, “The new standard IEC 61482 and experiences with the box method for testing of clothing for protection against the thermal hazards of an electric arc”, 8th International Conference on Live Maintenance, ICOLIM 2006, June 7-9, Prague.
- [3] Norma IRAM 3904-2004, “Indumentaria de protección. Requisitos y métodos de ensayo de materiales y prendas utilizados ante riesgo de exposición al arco eléctrico”, Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- [4] Norma UNE-ENV 50354/2001, “Métodos de ensayo de arco eléctrico para los materiales y prendas de vestir utilizados por los trabajadores con riesgo de exposición a un arco eléctrico”, Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR.
- [5] British Standard DD ENV 50354/2001, “Electrical arc test methods for material and garments, for use by workers at risk from exposure to an electrical arc”, British Standards Institution, BSI.
- [6] Norma IRAM-INTI-CIT G 7811, “Textiles. Procedimientos de lavado y secado para ensayos textiles.”, 08/05/1998.
- [7] ISO Standard 3175-2, “Textiles. Professional care, dry cleaning and wet cleaning of fabrics and garments. Part 2: Procedure for testing performance when cleaning and finishing using tetrachloroethene.”, Second edition, 2010.
- [8] IEC Standard 61482-1-1, “Live working. Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc. Part 1-1: Test methods. Method 1: De termination of the arc rating (ATPV or  $E_{BT50}$ ) of flame resistant materials for clothing”. Edition 1.0, 2009-05.
- [9] IEC Standard 61482-1-2, “Live working. Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc. Part 1-2: Test methods. Method 2: Determination of arc protection class of material and clothing by using a constrained and directed arc (box test)”. First edition, 2007-01.
- [10] ASTM F1959/F1959M-06ae1, “Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing”, American Society for Testing and Materials.
- [11] NFPA 70E, “Standard for Electrical Safety in the Workplace”, National Fire Protection Association, 2012 Edition.
- [12] Thomas E. Neal, Allen H. Bingham, Richard L. Doughty, “Protective Clothing Guidelines for Electric Arc Exposure”, IEEE Transactions on Industry Applications, July/August 1997.
- [13] Richard L. Doughty, Thomas E. Neal, Terrence A. Dear, Allen H. Bingham, “Testing Update on Protective Clothing and Equipment for Electric Arc Exposure”, IEEE Industry Applications Magazine, January/February 1999.
- [14] Aidan M. Graham, Michael Hodder, Gary Gates, “Current Methods for Conducting an Arc Flash Hazard Analysis”, Industry Applications Conference, 39th IAS Annual Meeting, 3-7 Oct. 2004.

- [15] Hugh Hoagland, Arc-Flash PPE Research Update, IEEE Transactions on Industry Applications, May/June 2013.
- [16] IEC Standard 61482-2, "Live working. Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc. Part 2: Requirements". Edition 1.0, 2009-04.

## ANÁLISIS DE CAPACIDADES Y ESTIMACIÓN DE TIEMPOS DE UN INVERSOR CMOS

Edgardo Ricci, Marcial Agostini, Juan Serrangeli, Walter Aróztegui, José Rapallini, María Victoria Quijano, Antonio Quijano

UIDET – CeTAD, Calle 116 y 48 Depto. de Electrotecnia (2do piso)  
Facultad de Ingeniería, UNLP. La Plata (1900). Email: [jorap@ing.unlp.edu.ar](mailto:jorap@ing.unlp.edu.ar)

### INTRODUCCION

Los análisis y comparaciones desarrollados en el presente trabajo tienen como objetivo lograr estimaciones de tiempos de subida y bajada y tiempos de propagación de una compuerta inversora diseñada en tecnología CMOS de 500 nm sin carga (Fig. 1).

Esta propuesta se enmarca en un proyecto mayor, el cual tiene como fin el diseño de una librería de celdas CMOS (compuertas estáticas, biestables, etc) y la correspondiente caracterización de cada uno de sus componentes.

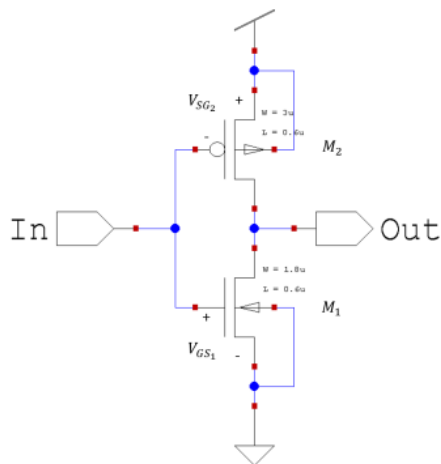


Fig. 1. Esquemático de un inversor CMOS.

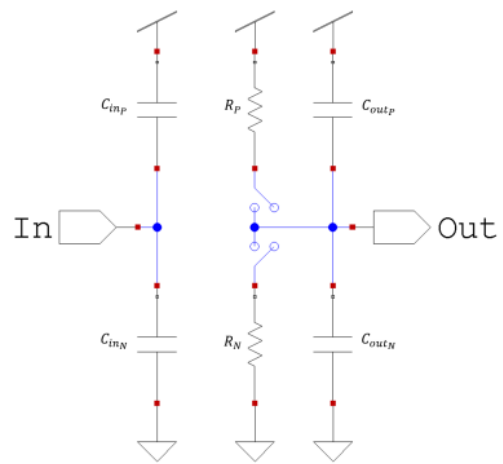


Fig. 2. Modelo de primer orden de un inversor CMOS.

### PROPUESTA DEL MODELO

Dado que se desean estimaciones de los tiempos característicos, el modelo de transistor utilizado en conmutación es un circuito simple, de primer orden, basado en resistores y capacitores. En la Fig. 2, puede apreciarse el modelo equivalente utilizado en conmutación. Este consiste en una capacidad de entrada  $C_{in}$ , un resistor  $R$  y una capacidad de salida  $C_{out}$ .

#### A. Capacidad de entrada

La capacidad  $C_{in}$  es una capacidad equivalente, la cual representa a todas las capacidades que se aprecian desde el terminal de entrada (gate) y será la que se utilizará como carga para etapas anteriores. Dicho equivalente está compuesto por 3 partes: la capacidad entre gate y drain ( $C_{GD}$ ); la capacidad propia del gate ( $C_G$ ) y la capacidad entre gate y source ( $C_{GS}$ ).  $C_{GD}$  es la capacidad entre el terminal de entrada y el nodo de salida.

Físicamente esto se debe al solapamiento entre gate y source, formando un capacitor con el óxido de gate como dieléctrico. Dado que esta capacidad experimenta una variación de tensión de  $2V_{DD}$ , se produce un aumento artificial de la misma. A este efecto se lo conoce como

Miller [1]. Dicha capacidad queda dada por (1), en donde  $W$  es el ancho del canal del transistor y  $C_{GDO}$  es la capacidad de solapamiento por unidad de largo de canal entre gate y drain.

$$C_{GDO} = 2WC_{GDO} \quad (1)$$

$C_G$  es la capacidad propia del gate con el sustrato, que puede pensarse como un capacitor de placas paralelas, con el óxido de gate oficiando como dieléctrico. Dicha capacidad queda expresada en (2), en donde  $L_{eff}$  es la longitud efectiva del canal estando en saturación y  $C_{ox}$  es la capacidad del óxido de gate, u óxido fino.

$$C_G = WL_{eff}C_{ox} \quad (2)$$

Por último, entre gate y source también tenemos una capacidad de solapamiento, la cual queda descrita por (3), en donde  $C_{GSO}$  es la capacidad de solapamiento por unidad de largo de canal entre gate y source.

$$C_{GD} = WC_{GSO} \quad (3)$$

Teniendo en cuenta las 3 contribuciones anteriormente descritas, la capacidad total de entrada del inversor queda dada por (4).

$$C_{in} = 2W_N C_{GDON} + W_N L_N C_{ox} + W_N C_{GSON} + 2W_P C_{GDOP} + W_P L_P C_{ox} + W_P C_{GSOP} \quad (4)$$

### B. Resistencia de canal

En el modelo planteado del transistor MOSFET, el canal está representado por una llave ideal (cuyo estado es dependiente de  $V_{GS}$ ) y por un resistor, el cual es un equivalente de todas las resistencias parásitas presentes en él.

Tanto el PMOS como el NMOS deben trabajar en saturación para poder proveer un camino de baja resistencia al transmitir un '1' o un '0' lógico hacia el nodo de salida, por ello las resistencias del modelo estarán establecidas por la inversa de la pendiente de la característica de salida de los transistores en saturación. Dichas expresiones son (5) y (6), en las cuales  $k'_P$  y  $k'_N$  representan la movilidad de los portadores multiplicada por la capacidad del óxido de canal ( $C_{ox}$ ).

$$R_P = \frac{1}{k'_P (W_P/L_P) (V_{DD} - |V_{TP}|)} \quad (5)$$

$$R_N = \frac{1}{k'_N (W_N/L_N) (V_{DD} - V_{TN})} \quad (6)$$

### C. Capacidad de salida intrínseca

La capacidad de salida intrínseca está asociada principalmente a dos efectos en el transistor: a la capacidad entre el nodo de entrada (gate) y el de salida (drain) y las capacidades de juntura en inversa presentes entre el sustrato y drain.

Entre el nodo de entrada y salida, la capacidad es la misma que se ha desarrollado previamente, la cual estaba sometida al efecto Miller, expresada en (1).

El otro aporte a la capacidad de salida está dado por la capacidad de juntura en inversa entre drain y sustrato. Este aporte a su vez es causado por dos factores: el primero es el área de drain en contacto con el sustrato y el segundo es el efecto de los bordes laterales del drain [2].

La capacidad del area inferior del drain responde a la expresión de un varactor, dado que la juntura está en inversa. Luego, esta capacidad puede expresarse en términos de capacidad por unidad de área y se denomina  $C'_{JDB}$ .

La capacidad de los bordes laterales del drain por unidad de área no es constante con la profundidad, lo que genera cierta dificultad en el cálculo de la misma. Otras complicaciones surgen debido a que los bordes del drain no son planos y que la concentración del dopaje no es constante en todo el dispositivo. Es por esto que se utilizan dos capacidades de borde exterior efectiva por unidad de longitud, una para el lado

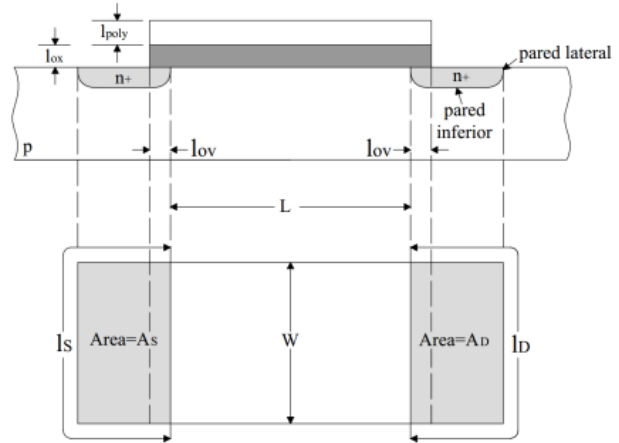


Fig. 3. Transistor NMOS. Sección transversal y vista superior.

cercano al óxido fino, denominada  $C'_{JDBGox}$  y otra para el del óxido de campo,  $C'_{JDBFox}$  (Fig. 3). En dicha figura también se muestra una vista superior de un transistor MOSFET, en la cual se aprecian las longitudes correspondientes a utilizar en los cálculos de las capacidades. La expresión de la capacidad entre drain y sustrato está dada por (7) [3].

$$C_{DB} = A_D C'_{JDB} + L_S C'_{JDBGox} + W C'_{JDBFox} \quad (7)$$

Del fabricante tenemos los valores de las tres capacidades de la expresión (7), pero referidas a un potencial de bias nulo ( $C_{JDB}$ ,  $C_{JDBGox}$  y  $C_{JDBFox}$ ).

Estos valores se corrigen mediante las expresiones (8), (9) y (10), a través de los datos de los potenciales de contacto y los coeficientes de graduación provistos por el fabricante.

$$C'_{JDB} = C_{JDB} [1 - (V_{BD}/P_B)]^{-M_j} \quad (8)$$

$$C'_{JDBGox} = C_{JDBGox} [1 - (V_{BD}/P_{BSW})]^{-M_{swj}} \quad (9)$$

$$C'_{JDBFox} = C_{JDBFox} [1 - (V_{BD}/P_{BSWG})]^{-M_{swjg}} \quad (10)$$

Teniendo en cuenta todas las contribuciones de las capacidades parásitas a la capacidad de salida equivalente, obtenemos la expresión (11).

$$C_{out} = 2W_{DN}C_{GDON} + 2W_{DP}C_{GDOP} + A_{DN}C'_{JDBN} + A_{DP}C'_{JDBP} + L_{SN}C'_{JDBGonN} + L_{SP}C'_{JDBGonP} + W_N C'_{JDBFonN} + W_P C'_{JDBFonP} \quad (11)$$

### ANÁLISIS DE TIEMPOS CARACTERÍSTICOS

Habiendo definido el modelo del inversor basado en tecnología CMOS así como sus componentes en función de la tecnología y parámetros del diseño, se procede al análisis y cálculo de los tiempos característicos de las celdas digitales.

Como ya se había mencionado, la parte de salida del modelo del inversor está formado por un circuito RC, que se compone de  $C_{out}$  y R. Dado esto, podemos definir una constante de tiempo  $\tau$  (12) la cual dependerá de  $R_N$  o  $R_P$ , según sea que se esté descargando o cargando el nodo de salida, y de  $C_{out}$ .

$$\tau = RC_{out} \quad (12)$$

Del análisis de un circuito RC [4] que es excitado por un escalón ideal de tensión tenemos que la respuesta posee la típica forma dada por una exponencial que tiene como asíntota al nivel de tensión dado por la amplitud del escalón (13).

$$V_{out}(t) = V_{escalón}(1 - e^{-t/RC_{out}}) \quad (13)$$

Igualando (13) a  $V_{escalón}/2$  y resolviendo para  $t$ , se obtiene el tiempo de retardo ( $t_d$ ), al cual se lo define como la diferencia entre el instante de tiempo en que el nodo de salida toma la mitad de su valor final y el instante de tiempo en el que el nodo de entrada toma la mitad de su valor (14). Dependerá si el nodo de salida se está cargando o descargando si el tiempo de retardo es el tiempo de un nivel alto a nivel bajo ( $t_{dHL}$ ) o viceversa ( $t_{dLH}$ ). Para obtener un tiempo de propagación medio, el valor de  $R_M$  es el promedio de  $R_N$  y  $R_P$ .

$$t_d = 0,69R_M C_{out} \quad (14)$$

El otro tiempo característico que es de interés en las celdas digitales es el tiempo de subida ( $t_r$ ) y bajada ( $t_f$ ) de los flancos de la señales de salida. El primero de estos se define como la diferencia entre los instantes de tiempo en que la señal toma el 90% de su valor final y el 10% del mismo, mientras que el segundo es el la diferencia entre el instante en que la señal toma el 10% de su valor final y el 90% del mismo. En ambos casos, dicho tiempo dependerá de la corriente que cargará o descargará  $C_{out}$  en el nodo de salida. Es por esto que el cálculo de dichos tiempos se separa en dos, dependiendo en que zona este trabajando el transistor [5]. Integrando entre los márgenes de interés,  $0,9V_{DD}$  y  $0,1V_{DD}$ , obtenemos las expresiones de  $t_f$  (15) y  $t_r$  (16) [1].

$$t_f = 2,2R_N C_{out} \quad (15)$$

$$t_r = 2,2R_P C_{out} \quad (16)$$

### CÁLCULO NUMÉRICO DE PARÁMETROS DEL MODELO

Luego de todo el análisis anterior, se dispone a calcular los valores de las capacidades, resistencias y tiempos del inversor de 500 nm. Como se ha mostrado en las expresiones, dichos valores dependen prácticamente de dos factores: en primer lugar depende de la geometría del inversor y en segundo lugar de la tecnología con la cual se lo construye. La geometría está dada por el diseñador (por ejemplo en el ancho y largo del canal), por lo que se puede utilizar a ésta como forma de control de los parámetros característicos. La tecnología es la que determina los parámetros de las capacidades por unidad de área, longitud, etc.

Las constantes utilizadas en los cálculos, dadas por el proceso tecnológico de fabricación, se obtuvieron de la entidad MOSIS. Dicha información es brindada a través de un archivo, que posee todos los parámetros necesarios para simular transistores con el modelo BSIM 3v3. En este caso, solamente se utilizaron algunos de dichos parámetros, no su totalidad.

TABLA I: PARÁMETROS DE DISEÑO

Parámetro	Símbolo	NMOS	PMOS
Longitud de canal	L	0,6 $\mu m$	0,6 $\mu m$
Longitud de drain	$L_D$	1,65 $\mu m$	1,65 $\mu m$
Ancho de canal	W	1,8 $\mu m$	3 $\mu m$

En la Tabla I, se muestran los parámetros de diseño de los transistores del inversor.

Los resultados de los cálculos de todos los componentes del modelo del inversor, tanto para los transistores NMOS y PMOS, se muestran en la Tabla II.



TABLA II : CAPACIDADES Y RESISTENCIAS PARÁSITAS

Parametro	Símbolo	NMOS	PMOS
Resistencia de canal en saturación	R	2305 $\Omega$	4556 $\Omega$
Capacidad de Miller	$C_{GD}$	0,644 fF	0,126 fF
Capacidad de juntura DB	$C_{JB}$	0,889 fF	2,472 fF
Capacidad periférica de óxido de campo	$C_{JSW}$	1,445 fF	1,144 fF
Capacidad periférica de óxido de gate	$C_{JSWG}$	0,245 fF	0,1527 fF
Capacidad de salida	$C_{out}$	8,26 fF	

Finalmente podemos calcular los tiempos de propagación y de flanco en subida y en bajada del inversor. Dichos resultados se muestran en la Tabla III.

TABLA III : TIEMPOS CARACTERISTICOS

Parametro	Símbolo	Valor
Tiempo de propagacion de '1' a '0'	$t_{dHL}$	13,2 ps
Tiempo de propagacion de '0' a '1'	$t_{dLH}$	26,1 ps
Tiempo de flanco de subida	$t_r$	41,9 ps
Tiempo de flanco de bajada	$t_f$	82,8 ps

## COMPARACIÓN DE TIEMPOS CON SPICE

Para contrastar los resultados de los cálculos de los tiempos realizados se procedió a realizar una simulación del inversor.

Dicha simulación se realizó con el modelo nivel 49 BSIM 3v3 del transistor MOSFET. Los parámetros de diseño tenidos en cuenta por esta simulación fueron el largo y ancho del canal y el ancho y área de drain y source. Los parámetros correspondientes a la tecnología de fabricación fueron los provistos por MOSIS.

La simulación se llevó a cabo con una señal de entrada cuadrada positiva de 3,3 V de amplitud, 1 ns de período y flancos prácticamente ideales. En "Fig. 4" se aprecia el resultado de dicha simulación. La forma de la onda de salida de la simulación responde a exponenciales, por lo que el modelo de primer orden planteado aquí, en principio, se ajusta correctamente a lo referido al tipo de forma. En cuanto a lo referido a los tiempos característicos determinados por la simulación, los mismos poseen una diferencia con los tiempos calculados, aunque todos se encuentran en el mismo orden de magnitud. En la "Tabla IV" se muestra la comparación entre los tiempos calculados y los que resultaron de la simulación.

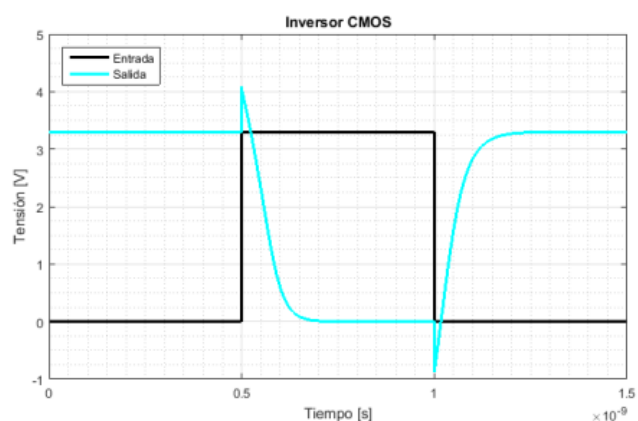


Fig. 4. Señales de entrada y salida de la simulación con SPICE.

TABLA IV: COMPARACION DE TIEMPOS

Parametro	Analítico	Simulado
$t_{dHL}$	13,2 ps	62,0 ps
$t_{dLH}$	26,1 ps	62,8 ps
$t_r$	41,9 ps	74,5 ps
$t_f$	82,8 ps	91,0 ps

## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Una de las conclusiones más importantes que se pueden desprender de este trabajo es que el modelo de primer orden planteado aquí no debe ser utilizado para la obtención de cálculos de tiempos precisos. En cambio, resulta muy útil como primer cálculo sencillo para poder determinar en qué orden de frecuencias puede funcionar el dispositivo.

La simulación de nivel 49 utiliza cerca de 200 parámetros relacionados con la tecnología, mientras que el análisis realizado en este trabajo utiliza 26. Aquí se produce una relación de compromiso entre la complejidad en la determinación de los tiempos y la exactitud de los mismos.

Como continuación de este trabajo se propone el análisis de tiempos característicos de compuertas más complejas, como la NAND y NOR, hasta poder realizar la caracterización completa de una librería de celdas digitales. Esto serviría como base para futuros proyectos en donde se utilicen dichas celdas, como lo puede ser una máquina de estado o una cadena de lógica combinatoria de control, de modo de poder determinar de manera sencilla los tiempos y frecuencias de tales proyectos.

Otra de las propuestas en la continuación de este trabajo es la determinación del efecto que posee cargar al inversor con otras compuertas. En este caso, a la capacidad de salida propia del inversor se le adiciona la capacidad de entrada planteada en el modelo. Esto provocaría que los tiempos se agranden, dado que la capacidad a cargar resulta mayor. Suponiendo una cierta cantidad de compuertas de carga constantes para todas las celdas (Fan out fijo), se agregaría otro tiempo característico a las celdas de la librería.

## BIBLIOGRAFIA:

- [1] P. Julian, *Circuitos Integrados Digitales CMOS. Analysis y Diseño*, Alfaomega. 2015
- [2] Y. Tsividis, *Operation and Modeling of the CMOS Transistor*, 2nd. edition, McGraw-Hill. 2010.
- [3] Y. Cheng, M. Chan, K. Hui, M. Jeng, Z. Liu, J. Huang, K. Chen, J. Chen, R. Tu, P. Ko, C. Hu, *BSIM3v3 Manual. Final Version*, cap. 9. 1995.
- [4] R. Baker, *CMOS, Circuit Design, Layout and Simulation*, 3rd edition, Wiley-IEEE Press, 2010.
- [5] B. Razavi, *Fundamentals of Microelectronics*, 2nd edition, Wiley. 2013.

## IMPLEMENTACIÓN EN MICROELECTRÓNICA DE UN DETECTOR DE SECUENCIA PROGRAMABLE

Edgardo Ricci, Nahuel Sede, Bruno Diez, Sebastián Rossi Grad, Walter Aróztegui, José Rapallini

UIDET – CeTAD, Calle 116 y 48 Depto. de Electrotecnia (2do piso)  
Facultad de Ingeniería, UNLP. La Plata (1900). Email: [jorap@ing.unlp.edu.ar](mailto:jorap@ing.unlp.edu.ar)

### INTRODUCCIÓN

En el proyecto de Microsistemas Colaborativos que se desarrolla en la UIDET–CeTAD, se proponen el diseño, análisis y ensayo de distintos módulos MEMS -(Sistemas Microelectromecánicos)-, su control y actuación con dispositivos de microelectrónica. Algunos de estos circuitos aplicados simples son desarrollados por alumnos que promedian la carrera de Ingeniería en Electrónica, cómo es el caso.

Este trabajo se enmarca dentro de la caracterización de un estándar de estos microsistemas autónomos especializados que puedan interactuar entre sí colaborando con sus distintas funciones en la resolución de un problema o acción específica sobre el medio que comparten, de la misma manera que funcionan una variedad de células especializadas dentro del torrente sanguíneo, aportando cada una característica diferente sobre un desempeño común. Se pretende que tales microsistemas sean auto-sustentados y puedan captar información del medio o accionar sobre él de acuerdo con las decisiones tomadas en base a los resultados comunicados por microsistemas vecinos con funcionalidades diferentes.

Lo presentado aquí se constituye como un subsistema de control para la etapa de comunicaciones y decisión. Tales sistemas pretenden efectuar acciones cooperativas en base a módulos de sensado y actuación sobre el medio. Módulos de sensado captan determinadas variables del medio y deben informar mediante un método sencillo de comunicación si tales variables se encuentran o no en el ambiente. Otros microsistemas vecinos deberían obtener esta información y decidir la activación de módulos específicos para la acción requerida en el medio.

Un sistema sencillo de comunicación supone el envío al medio de determinadas órdenes codificadas en números binarios, de manera continua y repetitiva. Con distintos microsistemas de sensado, pueden ser recibidas varias órdenes y los módulos receptores deberían decidir si corresponde a ellos actuar o no. El sistema de recepción y decisión más sencillo consiste en una máquina de estado que diferencie secuencias de bits determinados y los utilice de la misma manera que un procesador traduce un código de operación. Tal secuencia sólo permitirá la actuación de determinados módulos, así como secuencias distintas lo harán sobre otros. Cada uno responderá a una determinada secuencia, por lo que la máquina de estados se basará en una secuencia básica programable para cada sistema de acuerdo a su capacidad diferenciada de actuación. Una secuencia de 4 bits nos permitirá determinar la actuación de grupos de sistemas de 16 clases distintas de sensado o acción sobre el medio.

La etapa de comunicación propiamente dicha se debe determinar de acuerdo a las características de propagación del medio donde actúen los grupos de sistemas. En este trabajo sólo se centra en el circuito utilizado para la captación y decisión de las órdenes una vez recibido el flujo secuencial de bits.

Se llevará cabo entonces, un análisis del procedimiento utilizado para la síntesis del detector de secuencia (DDS) programable de 4 bits. Se analizarán los procedimientos posibles a seguir y se dará una explicación del porqué del camino seguido.

## EXPERIMENTACIÓN, DISCUSIÓN Y RESULTADOS

### I. CONFIGURACION DEL CIRCUITO

El fin de este detector es el siguiente: En base a una entrada de datos en serie, el usuario podrá programar según convenga, la búsqueda de una secuencia de 4 bits cualesquiera, y el circuito se encargara de avisar (dando una señal en la salida de un 1 digital) cuando encuentra dicha secuencia. Este aviso de detección de correspondencia se presentara en alto únicamente por un ciclo de Clock, luego del mismo se procederá nuevamente a la búsqueda de la secuencia seleccionada, no permitiendo en este caso el solapamiento de bits.

Para la resolución de este problema se procede a la síntesis de una máquina de estados finitos (MEF), donde, como es conocido existen dos tipos de planteo posibles, Moore y Mealy [1][2][3]. Este tipo de dispositivo requiere tanto de compuertas lógicas como de elementos de memoria (flip-flops) y de una entrada de Clock.

La diferencia entre estos dos tipos de máquina es que la salida del circuito, llamémosle Z, en el primer caso es una función lógica que depende solamente de los estados de los flip-flops, mientras que en el modelo de Mealy, la salida depende tanto de los estados de los flip-flops, como de los datos de entrada.

#### A. Síntesis con Mealy

En principio se decide la utilización del modelo de Mealy ya que presenta un menor número de elementos de memoria, lo que a pesar de una mayor lógica combinatoria en las distintas funciones, redundaría en una menor superficie en su implementación física. Se observa en el diagrama de la figura 1 para una máquina de tipo Mealy que el número de estados requerido para el funcionamiento es cuatro, por lo que se necesitarían únicamente dos flip-flops. En el diagrama se utilizan las siguientes notaciones:

- A-B-C-D: Secuencia que se desea leer, donde A es el bit más significativo y D el menos significativo.
- S0 a S3: Estados de los Flip-Flops.
- E: Entrada de datos.

Quedando las ecuaciones de las funciones lógicas obtenidas:

$$D1 = /Q1 ./Q0 ./A ./E ./B + E.B + Q1 ./Q0 ./A .(C.E + /C ./E + /B.C) + Q1.Q0.A ./E ./B + E.B + Q1 ./Q0.A.(C.E + /C ./E + /B.C) + Q1.Q0.A.B.C.E \quad (1)$$

$$D0 = /Q1 ./Q0 ./A ./E + A.E + /Q1.Q0 ./A.B ./E + Q ./B.E + Q1 ./Q0 ./A .(C.E + B.C + /C ./E) + Q1 ./Q0.A.(C.E + /B.C + /C ./E) + Q1.Q0 ./A.D ./E + Q1.Q0.A.(E ./D + B.C.D.E) \quad (2)$$

$$Z = Q1.Q0.(E.D + /E ./D) \quad (3)$$

Utilizando un número reducido de pruebas se pudo verificar que la MEF en principio funciona. Por lo que se procedió a su síntesis a partir de un software de CAD.

En su simulación se detectan problemas debido a que la lógica de una máquina de Mealy necesita una mejor sincronización entre el flujo de entrada de datos y los cambios en los estados, por lo tanto se presentaban falsas lecturas y glitches. Este problema ocasiona que la conveniencia prevista para la síntesis a partir de Mealy, ya no sea preponderante.

#### B. Síntesis por Moore:

Se procede entonces a la síntesis a partir de una máquina de estados Moore, que tendrá más elementos de memoria, pero en base a que la salida ahora sólo dependerá de los estados, simplificará las funciones lógicas, así como la sincronización, a pesar de un

pequeño incremento en el plano de los layout al implementarlo físicamente. Debido a que la secuencia consta de 4 bits, se requerirían cuatro estados, cuya función sería la detección del Bit correspondiente y un quinto estado el cual sería únicamente utilizado para indicar que la secuencia fue detectada. La cantidad de flip-flops necesaria (3) nos brindaría 8 estados posibles, utilizando únicamente 5 de estos.

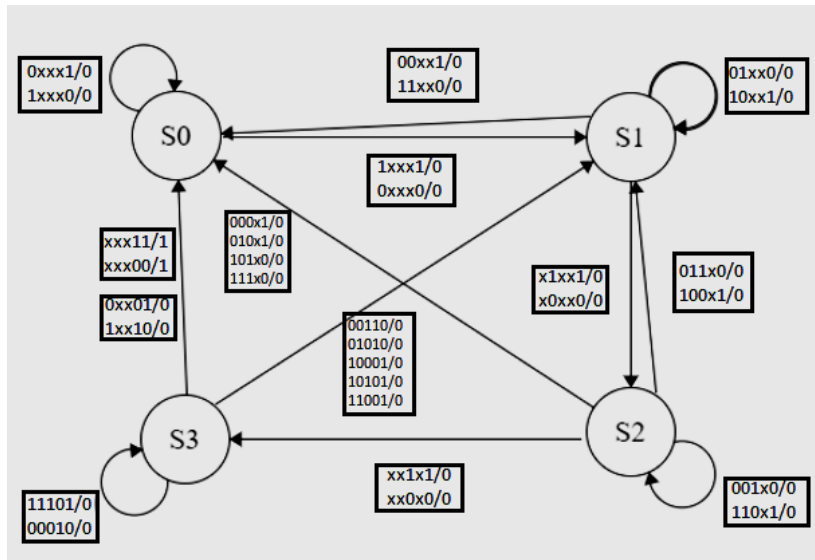


Fig.1 Diagrama de estados Mealy

A diferencia de Mealy la salida de esta máquina presenta una salida sincrónica con los estados y cumple perfectamente con los requisitos especificados del DDS. Por lo tanto procedemos a la síntesis de la misma haciendo uso del diagrama de la figura 2. Las funciones a sintetizar son las siguientes:

$$D0 = /Q2./Q1./Q0./A./E+A.E + /Q2./Q1.Q0./A.B./E+A./B.E + /Q2.Q1./Q0./A.(C.E+B.C+/C./E) + /Q2.Q1./Q0.A.(C.E+/B./C+/C./E) + /Q2.Q1.Q0./A.D.E+A./D.E \quad (4)$$

$$D1 = /Q2./Q1.Q0./A./B./E+B.E + /Q2./Q1.Q0.A./B./E+B.E + /Q2.Q1./Q0./A.(C.E+/B.C+/C./E) + /Q2.Q1./Q0.A.(C.E+/B./C+/C./E) + /Q2.Q1.Q0.A.B.C.E./D(2) \quad (5)$$

$$D2 = /Q2.Q1.Q0./A.D./E+A./D.E \quad (6)$$

$$Z = Q2./Q1./Q0 \quad (7)$$

Luego de esto se procedió a verificar la frecuencia máxima de funcionamiento del circuito. Para ello simplemente se realizaron varias simulaciones aumentando secuencialmente la frecuencia del reloj y de los datos en cada una de ellas.

Se comprobó que alrededor de 50 MHz de trabajo se encuentra la frecuencia máxima de funcionamiento. Este tope de frecuencia se debe a varios factores [4]:

- Primero por el tiempo de retardo de cada compuerta lógica del circuito, sabemos que cada una de ellas implica cierto tiempo entre la lectura de las entradas y la reacción de la salida, es así que este se convierte en el primer factor en limitar la frecuencia.

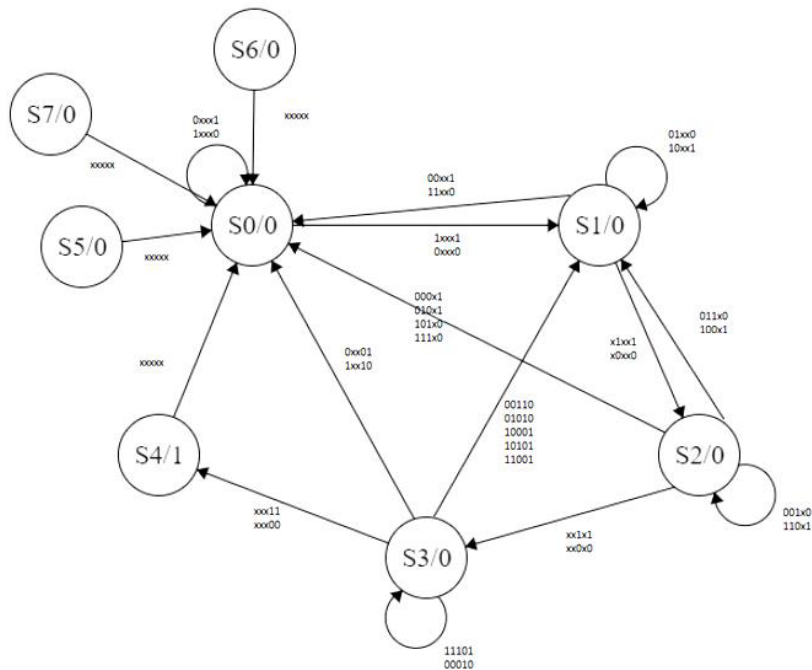


Fig.2 Diagrama de estados Moore

• En segundo lugar se encuentran los flip-flops. Para el debido funcionamiento de estas compuertas es necesaria cierta estabilidad en el tiempo en los datos de entrada para la correcta lectura de los mismos. Estos tiempos son conocidos como tiempos de set up y de hold. El tiempo de set up es el tiempo mínimo previo al flanco de reloj en el que el dato tiene que mantenerse estable para una correcta lectura, y el tiempo de hold es el tiempo posterior al flanco necesario de estabilidad del dato. En definitiva estos tiempos nos limitan cuanto pequeño puede ser el período de reloj y, en consecuencia, su frecuencia.

• Por último otro factor culpable del límite de frecuencia de trabajo son las capacidades parásitas de los transistores. Se sabe que la tecnología utilizada es CMOS -(Metal-Óxido-Semiconductor-Complementario)-, por ende cada compuerta lógica está formada por transistores PMOS -(MOS de canal P)- y NMOS -(MOS de canal N)-, los cuales acarrean consigo capacidades parásitas que, a altas frecuencias, toman valores significativos en los cálculos de los circuitos, y comienzan a alterar el paso de los datos, llevando al mal funcionamiento del dispositivo.

## II. DISEÑO DEL LAYOUT

En primer lugar se procedió a plantear el diseño global. Se utilizó una tecnología de 0,5 nm y se acordó separar la máquina en 3 partes principales. Esto disminuye de manera significativa el tamaño del pitch, permitiendo trabajar con división de las conexiones. En el caso que no se hubiera separado, esto habría implicado ampliar el pitch hasta que se tenga por lo menos 24 conexiones sin contar las intracompuertas [4][5][6]. Separando los flip-flop utilizamos un pitch que contenga 15 conexiones.

De abajo hacia arriba se utilizó el siguiente esquema de conexión:

- Para ffd D0 se utilizó la línea 15 para clock, A-1 B-2 C-3 D-4 E-5 /Q0-6 Q0-7 dejando las restantes para las conexiones entre compuertas.
- Para ffd D1 se utilizó un esquema similar al anterior pero con las negaciones de las entradas, el esquema de conexión quedó: clock-15 /A-1 /B-2 /C-3 /D-4 /E-5 /Q1-6 Q2-7
- Para ffd D2 se utilizó la línea 15 para clock, como era la línea más chica se aprovechó el espacio sobrante para los inversores de las entradas y la salida.



- Para generar las conexiones se utilizó metal 2 con un ancho de 4um para poder conectar entre metal 1, 2 y 3 respetando las condiciones que la tecnología utilizada aconseja. La separación entre cada conexión es la mínima ya que al ampliar el pitch se aumenta de manera significativa la resistencia de la capa de polisilicio. Las conexiones verticales se efectuaron con metal 3 de ancho de 6um. Se decidió utilizar una estructura de peine de manera que los vcc y gnd queden conectados. El primer diseño planteaba también un segundo corte en cada flip flop pero no se pudo llevar a cabo ya que las conexiones con metal 3 requieren más separación que el resto de los metales.

- Una vez definidas las bases se procedió a generar de manera independiente cada una de las compuertas que se necesitarían y comprobar su correcto funcionamiento. Terminado esto se realizó la implementación de modo inverso, es decir, desde las etapas finales del circuito hasta las iniciales. Empezando con los flip flops se hicieron las conexiones separando al diseño en columnas cuyas conexiones sean similares para generarlas de manera más corta.

- Por ejemplo se alinearon en columnas todas las compuertas cuyas entradas incluían a Q0, Q1, Q2 y sus negados para después poder utilizar los canales de conexión 6 y 7 en el resto del circuito. Se generó un archivo de respaldo para comprobar que las conexiones estuvieran bien en pequeños grupos y una vez terminado se comparó con el original.

Completado el circuito y comprobado que su funcionamiento fuera igual al esquemático que se muestra en la figura 3, se procedió a terminar los detalles. Como se muestra en la figura 4, se agrupó todo de manera que ocupara el menor espacio posible, se ensancharon los canales de vcc y gnd para disminuir su resistencia.

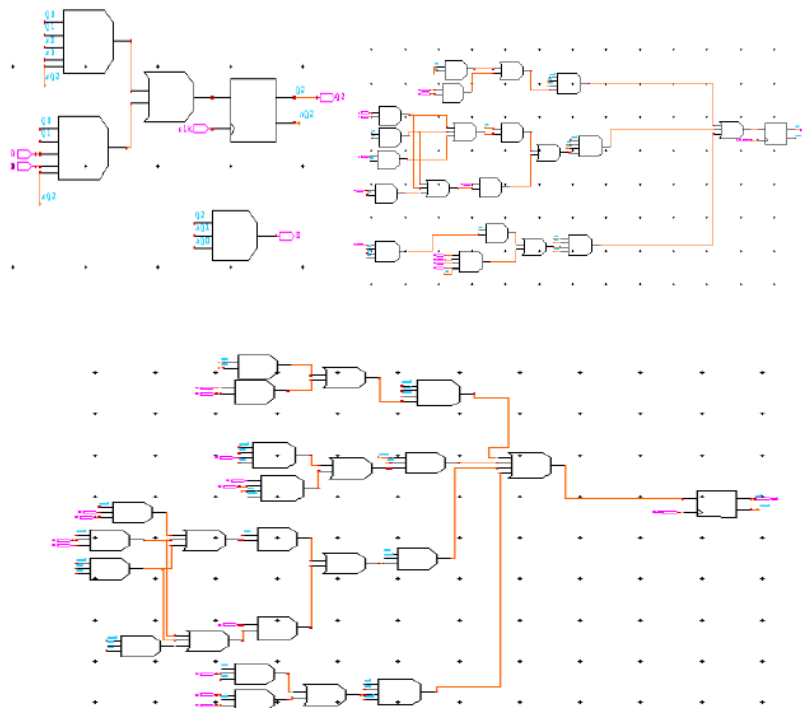


Fig.3 Circuito de simulación

## CONCLUSIONES

Se ha conseguido un diseño correcto con un grado de dificultad interesante para alumnos en formación. La complejidad obtenida no es tanto en cuanto a los circuitos digitales en sí, sino a la descripción en layout obtenida, con las complicaciones que estas conllevan. Además de la utilidad que se espera para este diseño, el mismo sienta una base de conocimiento en el grupo que aquí trabajó, para continuar hacia diseños más complejos

como unidades de control en la línea de diseños de procesadores, que también se cuenta como una de las tareas abarcadas por el presente proyecto al que se ha referido anteriormente.

Se espera en un futuro, continuar con el desarrollo del mismo, con la simulación del layout para luego completar detalladamente la descripción física e integrar con el diseño completo propuesto para su fabricación.

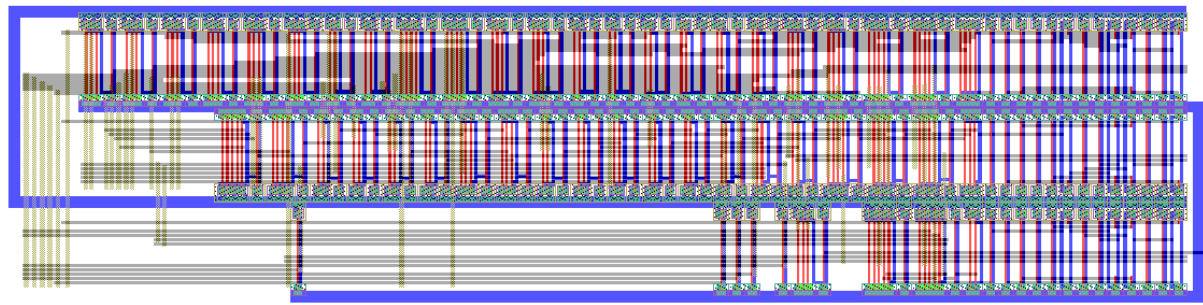


Fig 4. Layout del DDS

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Taub – Schilling, Digital integrated circuits. McGraw – Hill. 1982.
- [2] H. Taub, Circuitos digitales y microprocesadores. McGraw – Hill. 1982.
- [3] R. Tocci, Sistemas Digitales: principios y aplicaciones. Prentice Hall. 1996
- [4] P. Julián. Circuitos Integrados Digitales CMOS, Análisis y diseño. Alfaomega. 2015.
- [5] B. Razavi, Fundamentals of microelectronics, 3rd Edition, Wiley. 2014
- [6] R. J. Baker, CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation, 3rd Edition, 3 edition. Piscataway, NJ : Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2010.

## IMPLEMENTACIÓN DE MULTIPLICADOR DE 4 BITS

Juan De La Puente, Joaquín Hernán Costa, Edgardo Ricci

UIDET – CeTAD, Calle 116 y 48 Depto. de Electrotecnia (2do piso)  
Facultad de Ingeniería, UNLP. La Plata (1900). Email: [josrap@ing.unlp.edu.ar](mailto:josrap@ing.unlp.edu.ar)

### INTRODUCCIÓN

A través del diseño de circuitos digitales básicos se pretende la realización de un multiplicador digital de 4 bits. Esta propuesta didáctica se enmarca en un proyecto mayor en el que se utilizan diseños de arquitecturas de microprocesadores sencillos en procesos inteligentes de comunicación y decisión en módulos de micro-sistemas.

Tales arquitecturas se diseñan paulatinamente a partir de pequeñas partes, en tareas individuales para luego integrarlos en las partes constitutivas mayores (Unidades Aritmético Lógicas, Unidades de Control, etc.). Como resultado final se efectúa una comparación entre ambas tecnologías de implementación, destacando tanto las ventajas como las dificultades que surgen de cada una de ellas.

### PARTE EXPERIMENTAL

#### Diseño de Componentes Básicos

El multiplicador partió de la realización de las librerías de celdas básicas necesarias para la realización del diseño tales como compuertas NAND, NOR y negadoras. Se generaron los circuitos esquemáticos que luego fueron asociados a símbolos y posteriormente fueron simulados para comprobar su funcionamiento. Por simplicidad aquí se mostrará únicamente el resultado obtenido para una compuerta negadora.

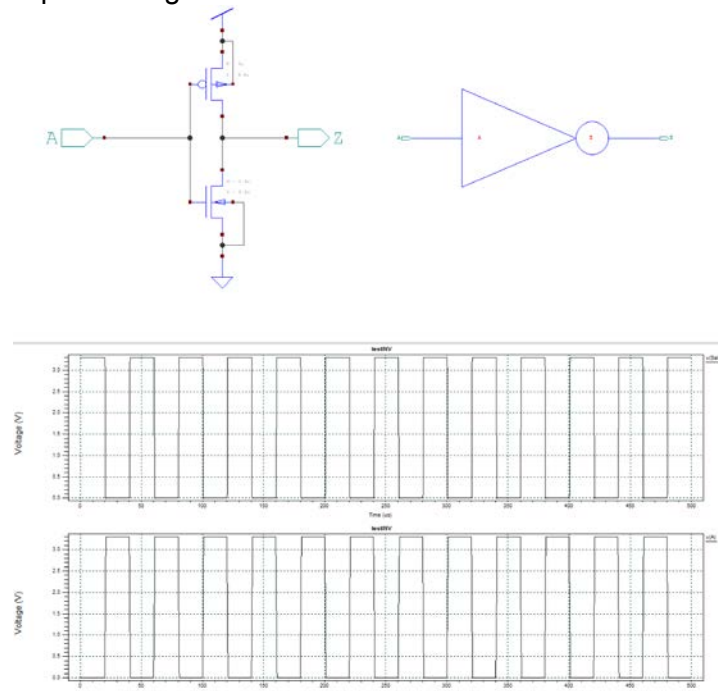


Figura 1: Generación de la compuerta negadora

En la figura 1 se muestra dicha compuerta desde el circuito esquemático hasta su simulación. Se observó que para una entrada en alto (1 lógico) la salida se encuentra en bajo (0 lógico) y viceversa. Dicho comportamiento coincide con el funcionamiento esperado para el negador. Es

importante tener en cuenta que en este caso el tiempo de retardo de la inversión es muy pequeño, del orden de las decenas de *picosegundos*, debido a que no hay ninguna compuerta lógica adicional entre la señal de entrada y salida (sólo se encuentran los 2 transistores propios del negador). En las secciones siguientes se verá que entre la señal de entrada y la señal de salida, habrá alrededor de 100 transistores, lo cual provocará un retardo entre la salida y la entrada que será un limitante dado por la tecnología en la que se trabajó. Es por esto que se deben tener en cuenta estos retardos en la implementación y compensarlos al máximo para lograr un correcto funcionamiento [1], [2]

Este procedimiento se repitió para el resto de compuertas lógicas básicas de manera de crear una librería propia para efectuar la implementación del multiplicador.

### Multiplicación de números binarios

La multiplicación de números binarios se realiza de la misma manera que para números decimales con la diferencia de que en binario al tener representados los números unos y ceros, los productos parciales son más sencillos. Un factor importante será que, cuando se desee implementar un producto de números de 4 bits habrá cuatro productos parciales que deberán ser resueltos por el circuito a implementar [3].

### Elección del diseño a implementar

Línea de Selección	Salida
00	A:GND
01	B:X
10	C:2X
11	D:3X

Tabla 1: Líneas de entrada de los multiplexores.

Para la implementación se propone un circuito que utiliza dos multiplexores 4:1, en el cual el multiplicando (en adelante X) se conecta en las líneas de entrada de los multiplexores y los dos bits menos significativos del multiplicador (en adelante Y) se conectan en las líneas de selección de un multiplexor (que llamaremos mux LSB) y los más significativos en las líneas de selección del multiplexor restante (que llamaremos mux MSB). De esta manera se realizan dos productos parciales por multiplexor, que luego, con los correspondientes corrimientos se sumarán dando el resultado del producto entre X e Y.

En la tabla 1 se muestra cómo se implementaron las líneas de entrada a los multiplexores, la línea A es cero siempre por lo que se encuentra conectada a tierra, la línea B corresponde al multiplicando X, la línea C es X desplazado 1 bit a izquierda y la D es la suma de las líneas B y C, debiendo utilizarse un sumador de 5 bits dado que se consideró el desplazamiento de la línea C.

Es importante ver que dadas las características de las líneas C y D se deben adicionar dos bits conectados a tierra en las líneas A y B para contemplar tanto el desplazamiento de la tercer entrada como el acarreo que arroja el sumador de la cuarta entrada; esto resulta en que los multiplexores deben tener un bus de 6 bits por entrada.

Del mismo modo resultó necesario que a la salida de los multiplexores se agreguen dos líneas a tierra (las más altas para mux LSB y las más bajas para el mux MSB) de manera de entrar al sumador de salida con 8 bits por operando. Los sumadores utilizados en esta implementación son del tipo *Ripple Carry*, lo cual genera un retardo de propagación que influye en las líneas de entrada de los multiplexores y debe ser compensado con un retardo equivalente en las otras líneas de entrada para asegurar que los datos lleguen al mismo tiempo y el resultado sea correcto.

Por otra parte el sumador de salida debe ser de 8 bits ya que se contempla el caso en el que X e Y sean 1111. En las figuras 2 y 3 se observa el circuito esquemático resultante del diseño a

implementar, se agregó además una línea para habilitar o deshabilitar el circuito dado que al no haberse implementado un árbol de retardos en las entradas y además por simplicidad del circuito se decidió no utilizar *Latches*, surgió la necesidad de contar con un control asíncrono de la etapa de multiplexores para asegurar la estabilidad de los datos de entrada y salida.

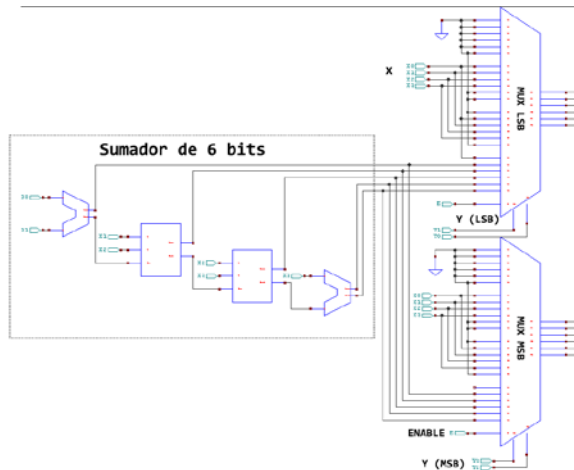


Figura 2: Circuito esquemático de la etapa de entrada.

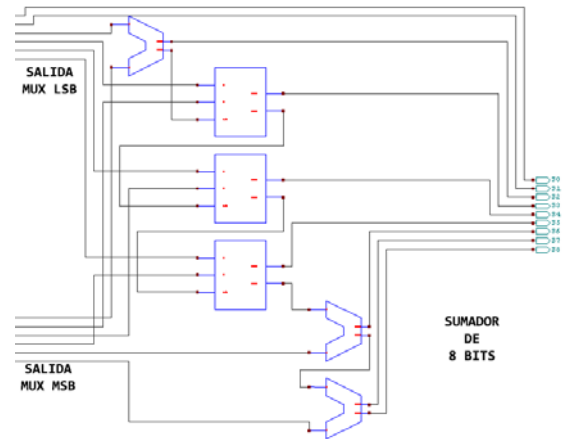


Figura 3 : Circuito de la etapa de salida.

### Etapa de Simulación

Ya realizado el esquemático del multiplicador se realizó la simulación de todas las combinaciones posibles de multiplicaciones. Por simplicidad en la tabla 2 se muestran sólo cuatro casos de los 256 posibles. Durante la simulación, se prestó especial atención al mayor producto posible (1111x1111), cuidando que el desborde del bit más significativo no se pierda. Se observó además a la línea de enable y se comprobó que cuando la línea está en 0 a la salida vale cero independientemente de los valores de X e Y como era esperado.

$X_2$	$X_1$	$X_0$	$X_0$	Enable	$Y_3$	$Y_2$	$Y_1$	$Y_0$	Salida
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0000000
1	1	1	1	1	1	1	1	1	11100001
0	1	1	0	1	1	0	1	1	01000010
1	1	0	0	0	0	1	0	1	0000000

Tabla 2: Algunos resultados de la simulación

Los datos ingresados al multiplicador fueron configurados de manera tal que duren 20  $\mu$ s, es decir que cada 20  $\mu$ s se realiza un producto diferente. Cabe aclarar que la salida está simulada por bits, siendo el bit más significativo y el bit el menos significativo. Como se puede ver en la figura 4, la salida vale cero a partir de los 60  $\mu$ s debido a que el *Enable* está en cero.

Una vez comprobada la funcionalidad del dispositivo implementado, se medirá el peor tiempo de retardo del multiplicador, lo que ocurre cuando se realiza el producto entre 1111 y 1111, ya que es en este caso que se da la mayor utilización de compuertas en el dispositivo. Las señales de entrada fueron configuradas de manera tal que el tiempo que tardan en pasar de 0 a 1 o viceversa es de 1  $\mu$ s. Se tomó esta decisión para evitar los posibles *glitches* que se generan en el simulador por utilizar tiempos más rápidos.

Para llevar a cabo la medición, se comienza haciendo el producto entre 0000 y 0000 y luego se conmutan tanto los bits X como los Y a 1111 para poder medir el tiempo de la transición, ya que al multiplicar por cero no se utiliza ninguna de las compuertas del dispositivo. El bit a analizar es el , ya que es el que más tarda en alcanzar un valor estable, por lo tanto éste es el que genera el peor caso.

Para determinar el tiempo de retardo, se debe hacer la diferencia entre el tiempo en que la señal de entrada alcanza un 10% de su valor máximo y la de salida alcanza un 90% de su máximo valor. Dichos valores corresponden a: 330 mV para el 10% del valor máximo, y 2,97 V para el 90% del valor máximo. Como se puede ver en la figura 5, los cursores verticales fueron posicionados en los valores mencionados anteriormente, y se hizo coincidir los cursores horizontales con los verticales para tomar los tiempos en que se alcanzaban dichos valores. Se determinó que la señal de entrada alcanza un 10% del valor máximo a los 80,1  $\mu\text{s}$  y la señal de salida alcanza un 90% de su máximo valor a los 80,61  $\mu\text{s}$ . Haciendo la diferencia entre estos valores se obtuvo que el tiempo de retardo es de 0,51  $\mu\text{s}$ .

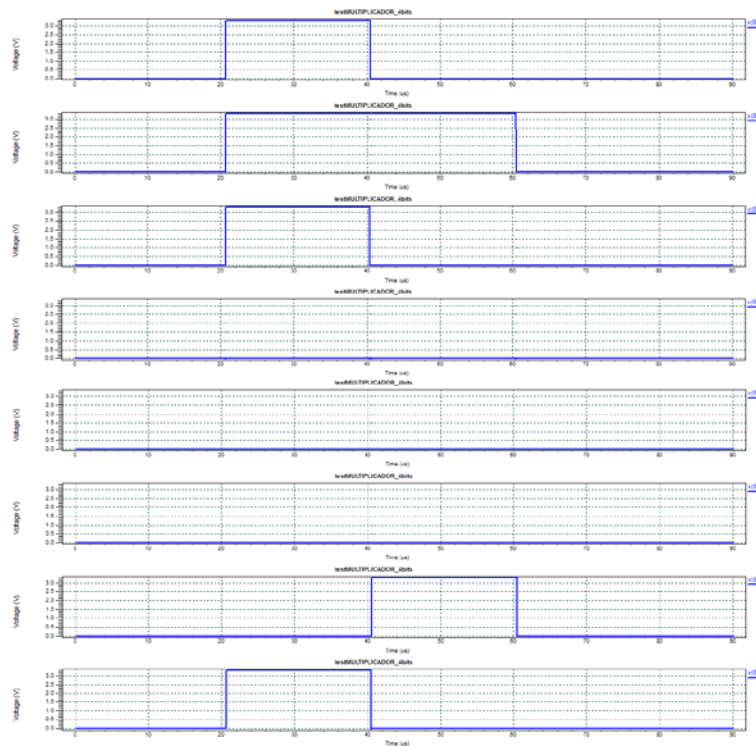


Figura 4: Simulación del multiplicador.

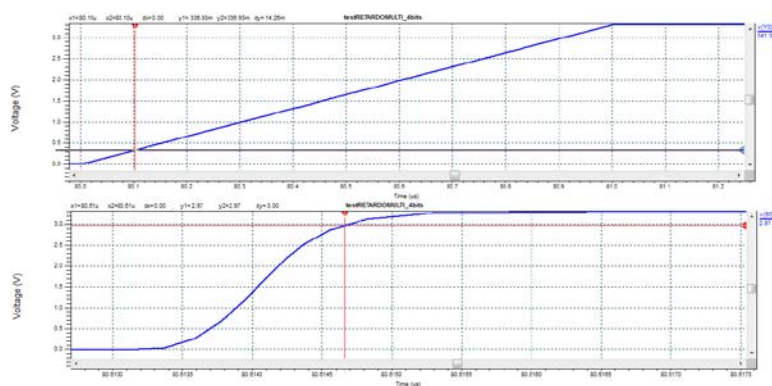


Figura 5: Medición de retardo del multiplicador.

### Diseño de *Layouts*

Sabiendo que el dispositivo implementado funciona correctamente, se pasa a desarrollar el *Layout* con el software de diseño utilizando una tecnología de 500 nm. Para ello, se desarrolló una



librería que contiene todas las celdas lógicas digitales básicas necesarias para hacer los componentes que forman parte del multiplicador.

Una vez elaborada la librería, se llamó de ésta a las distintas celdas, y conectándolas entre sí, se consiguieron los dos tipos de sumadores requeridos (*Half Adder* y *Full Adder*) y el multiplexor 4:1. Con estos elementos incorporados en la librería y llevando a cabo el mismo procedimiento anterior, se desarrolló el multiplicador. Por motivos de espacio, sólo se mostrará el *Layout* del multiplexor 4:1 en la figura 6.

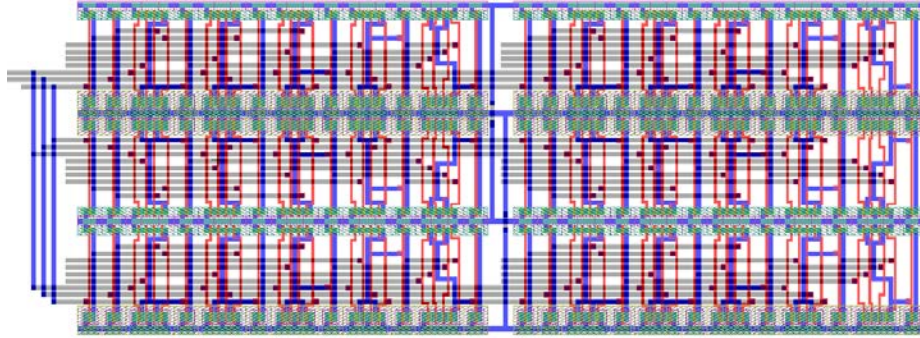


Figura 6: *Layout* de un multiplexor 4:1 de 6 bits.

### Implementación en Verilog

Dado que Verilog es un lenguaje que permite programar de manera modular se partió del diseño elegido y se programaron por separado los multiplexores y los sumadores que luego se instanciaron en el código del multiplicador, el que describe las conexiones entre éstos elementos constitutivos. Como la implementación en lenguajes de descripción de hardware requiere que exista una estructura jerárquica entre los módulos se aseguró que el código del multiplicador esté en el tope de esta jerarquía, de manera de evitar errores tanto en la compilación como en la conexión entre módulos. En la figura 7 se observa que el diagrama en bloques resultante coincide con el circuito esquemático obtenido anteriormente.

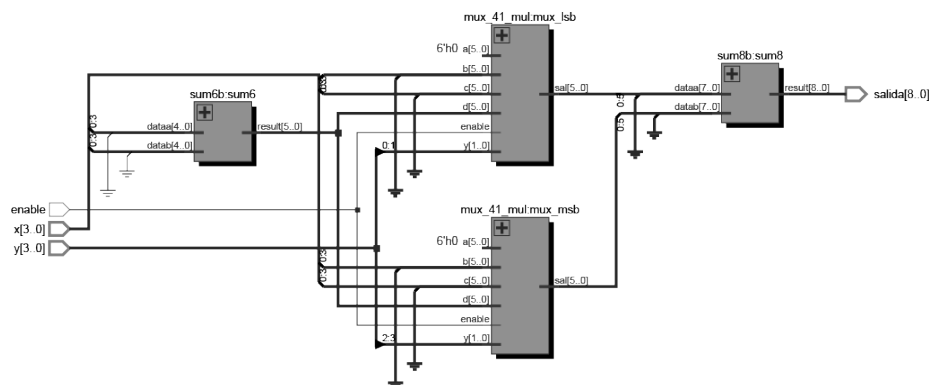


Figura 7: Diagrama en bloques del multiplicador implementado en Verilog.

Luego se verificó si los módulos internos coinciden con lo esperado. En el caso de los multiplexores (figura 9) se implementó una línea de *Enable* que permite inhibir la etapa de entrada como ya se expresó anteriormente. Por el lado de los sumadores (figura 10) el diseño de los mismos es idéntico, un *Half Adder* en el LSB y en el MSB y en los bits intermedios *Full Adders*, dichos sumadores se encuentran conectados a través de la línea de acarreo salvo en el *Half Adder* del MSB en el cual el carry out del sumador anterior es uno de los operandos.

Una vez comprobada la correspondencia entre el diseño original y lo realizado en el lenguaje de descripción de hardware se desea probar su funcionamiento. Para tal fin se simuló el circuito

digital y para ello se generó un nuevo código de Verilog del banco de pruebas de la implementación [4] y [5], en el cual se especifican los valores de las entradas del circuito así como el tiempo con el cual irán cambiando dichas entradas (cada 20  $\mu$ s). Esto es así ya que se pretende verificar el funcionamiento del multiplicador en distintas circunstancias de interés ya expuestas en la tabla de valores ingresados en la simulación realizada en la sección anterior.

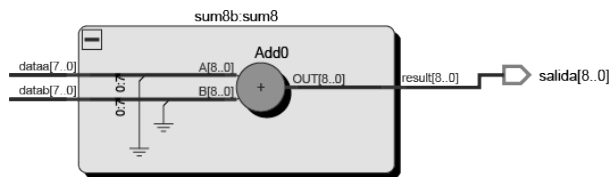
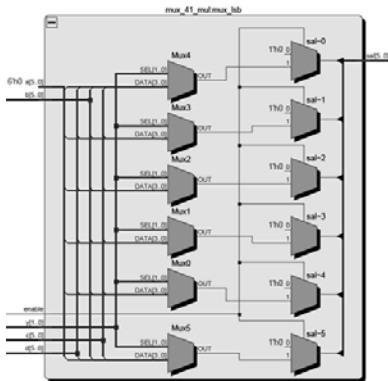


Figura 9: Esquemático del multiplexor      Figura 10: Esquemático del sumador.

En la figura 8 se muestran los resultados obtenidos y se comprueba que la implementación del multiplicador funciona como se esperaba, sin *Overflow* en el caso de la multiplicación más grande, resultado igual a cero en el caso de que alguno de los factores sea cero y las líneas de *Enable* funcionan correctamente.

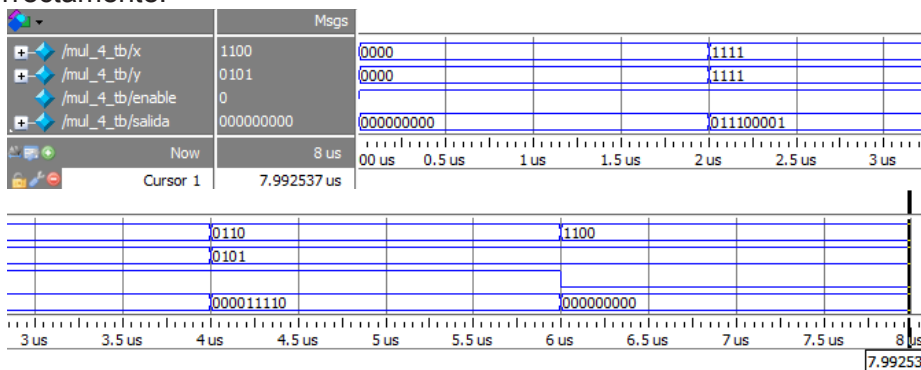


Figura 8: Simulación de la implementación en Verilog.

## CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos en el presente trabajo se lograron cumplir los objetivos planteados, adquiriéndose conocimiento sobre el uso de herramientas así como el conocimiento de las etapas de implementación y los criterios a utilizar en función de las especificaciones deseadas tanto como las consideraciones a tener en cuenta frente a las dificultades que se presentan.

Como se mencionó en la introducción este proyecto formará parte de un micro-sistema más complejo; más específicamente será uno de los módulos constitutivos de una unidad aritmético lógica.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Julian, *Circuitos Integrados Digitales CMOS. Análisis y Diseño*, ed. Alfaomega. 2015.
- [2] R. Baker, *CMOS Circuit Design, Layout and Simulation*, 3rd. edition, Wiley – IEEE Press. 2010.

- [3]R. Tocci, *Sistemas Digitales: Principios y aplicaciones*, ed. Prentice Hall. 1996.
- [4]S. Planitkar, *Verilog HDL: A Guide to Digital Design and Synthesis*, 2nd edition, Prentice Hall PTR, 2001. ISBN : 0-13-044911-3
- [5]Altera Corporation, *ModelSim-Altera Software Simulation User Guide*, January 2013.

## PLATAFORMA DE CÁLCULO BASADA EN TECNOLOGIA RECONFIGURABLE

Jorge Osio, Jorge L. Anderson, Eduardo Kunysz, José Rapallini

UIDET – CeTAD, Calle 116 y 48 Depto. de Electrotecnia (2do piso)  
Facultad de Ingeniería, UNLP. La Plata (1900). [jorge.osio@ing.unlp.edu.ar](mailto:jorge.osio@ing.unlp.edu.ar)

### INTRODUCCIÓN

En este trabajo se detalla el estado actual del diseño de la plataforma de cálculos de Alta Performarce (HPRC). Como objetivo principal se pretende especificar la selección final de componentes, así como la interconexión entre los mismos basándonos en la topología de comunicación seleccionada y la cantidad de recursos empleados por cada periférico. También se analizarán brevemente los costos de los componentes elegidos, debido a la necesidad de lograr una herramienta de bajo costo, y la topología de diseño elegida. Como conclusión final se dará una breve reseña de la continuación del proyecto.

### PARTE EXPERIMENTAL

Para el diseño del sistema HPRC a medida, en una primera etapa se realizó la planificación del sistema completo, seleccionando cuidadosamente cada uno de los elementos y definiendo las características de la interacción entre los mismos. Para el proyecto se eligió una topología con dos FPGAs (Arreglo de compuertas programables por campo), comunicadas entre sí por medio de una memoria compartida y puertos GTX (Gigabit transceiver, formado por una línea de clock y una interfaz de datos paralela) y GPIO (puertos de entrada / salida genéricos). Cada FPGA se encuentra conexionada a su vez con diferentes periféricos, estableciendo una topología asimétrica debido a la limitación de recursos disponibles. En la Fig. 1 se muestra un esquema general, donde a continuación se analizará brevemente cada uno de sus componentes.

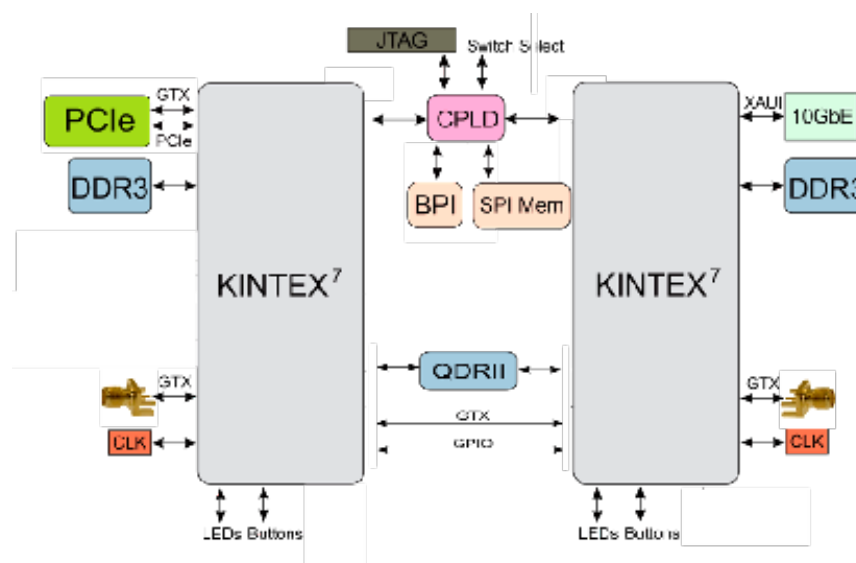


Fig. 1. Topología de diseño

### FPGA Kintex

Como base principal del proyecto se utilizó la serie 7 de la familia de FPGAs Kintex de Xilinx [1]. Debido a la necesidad de mantener cierta relación de compromiso entre los recursos disponibles, el tipo de encapsulado y el precio del componente en cuestión, se seleccionó la versión XC7K70T con encapsulado FBG676 (encapsulado ball grid array). De esta manera se disponen de 8 pines GTX, distribuidos en GTX Quads, 20 I/O HR (High-Range con soporte de tensión de 1.2V a 3.3V) y 100 I/O HP (High-Performance con soporte de tensión de 1.2V a 1.8V). En la Fig. 2 puede observarse la distribución de los diferentes recursos.

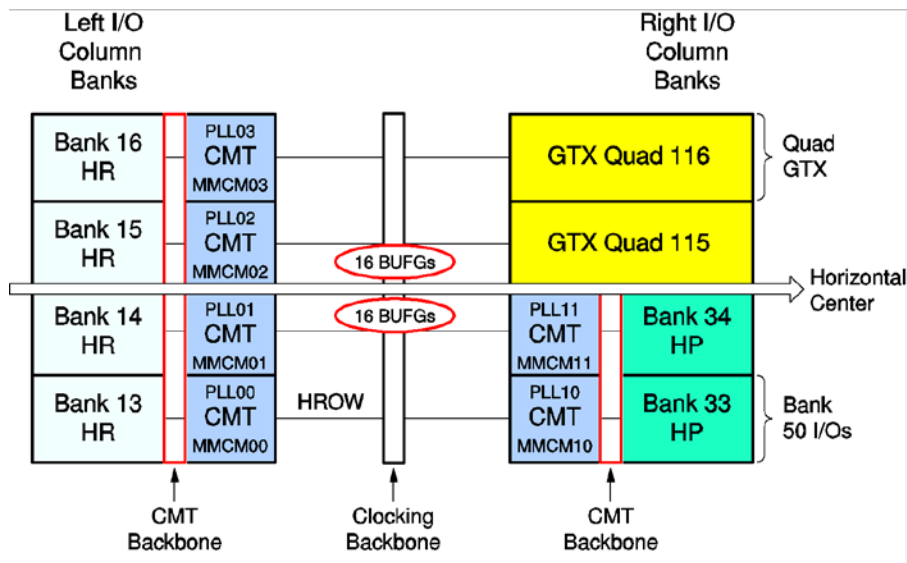


Fig. 2. Distribución de los recursos en la FPGA XC7K70T

### Memoria DDR3

Como memoria DDR3 SDRAM (Double Data Rate type three Synchronous Dynamic Random-Access Memory) se eligió la correspondiente a la empresa Micron [2], de 1 Gb con un tamaño de palabra de x8, distribuidas en 8 bancos. El encapsulado utilizado por esta memoria en particular es el 78BGA. Respecto al direccionamiento se utilizarán 3 puertos para la selección del banco más 14 puertos para la selección de la dirección. Al ser el tamaño de palabra de 8 bits, se utilizarán 8 puertos como salida de datos. Un total de 25 puertos, más los correspondientes puertos de control y comandos. A partir de estos números, se selecciona el Bank HP34 para el conexionado de la memoria.

### PCIe

El PCI Express es un bus para la interconexión de periféricos serie de alta velocidad. Debido a la limitación en la cantidad de recursos GTX, este periférico sólo se encuentra conectado a una sola de las FPGAs. Para su implementación se utiliza la totalidad de un GTX Quad, el cual consta de cuatro puertos GTX, obteniendo así un PCIe x4.

### Memoria QDRII+ (Quad Data Rate)

Para la comunicación entre FPGAs se propuso la utilización de la memoria CY7C2263KV18 de Cypress, la cual posee un tamaño de palabra de 18 bits, distribuidos en 4 arreglos de 512K (2M x 18).

### Puertos GTX

Otra de las formas propuestas para la comunicación entre las FPGAs, es por comunicación serie de alta velocidad por medio de los puertos GTX [8]. Debido a la limitación en la cantidad de puertos GTX disponibles, se optó por la utilización de 2 puertos reservados para la comunicación entre las FPGAs, más 2 puertos en cada FPGA para múltiples propósitos.

### CPLD (Dispositivo de Lógica Programable)

Para posibilitar la configuración de las FPGAs de diversas formas, se interconecta una CPLD XC2C128 de la familia CoolRunner II de Xilinx [4], con encapsulado 132-TFBGA, configurada a través del protocolo JTAG. Esta CPLD dispone de 100 puertos I/O de propósito general para su utilización.

Como se observa en la Fig. 3, la configuración de las FPGAs es realizada mediante 3 diferentes métodos. El primero de ellos se realiza mediante dos memorias SPI, destinadas una para cada FPGA. A su vez se dispone de una memoria BPI para ambas FPGAs, y una interfaz USB a través de un FTDI para emular la interfaz JTAG.

También se dispone la posibilidad de configuración mediante una interfaz JTAG externa.

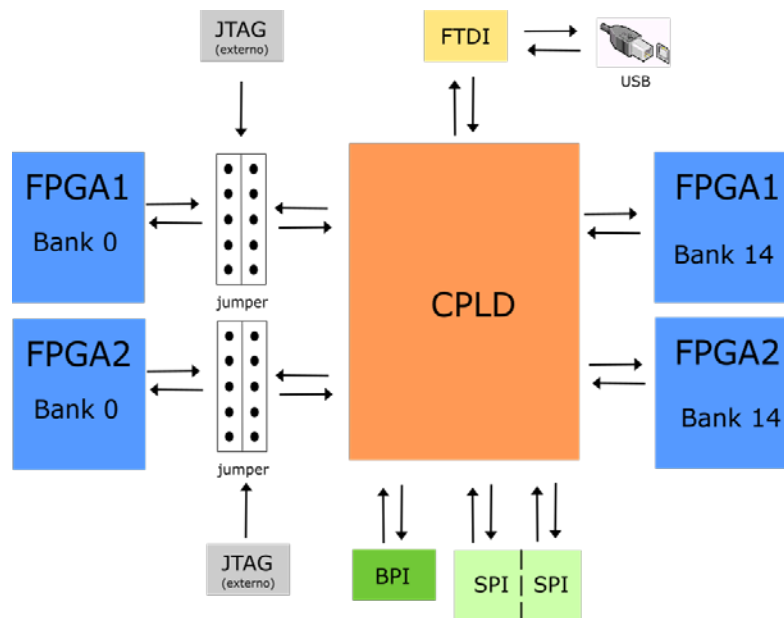


Fig. 3. Conexión de Configuración

### Memoria SPI (serial peripheral interface)

Para la configuración mediante una memoria SPI, o también para usos generales en caso de no utilizarse en la configuración, se asocian dos memorias de este tipo a la CPLD. Se seleccionó la memoria N25Q12 de 128 Mbits [6], la cual puede funcionar mediante protocolo Dual o Quad, compatibles con la serie 7 de FPGAs de Xilinx [7]. La misma posee una frecuencia de clock de 108 MHz, llegando a 432 MHz para el modo de operación Quad. Cabe destacar, que la memoria seleccionada posibilita su programación mediante la interfaz iMPACT [5], a través de la FPGA seleccionada. La configuración de la FPGA por medio de memoria SPI utiliza el banco I/O 14.

### BPI

Otra de las posibilidades de configuración de la FPGA es mediante una memoria Parallel NOR Flash o BPI (Byte Peripheral Interface) de Micron. Se considera la memoria de 1Gbit de 64Mx16, de encapsulado 56-TSOP.



**FTDI**

Para la implementación del protocolo JTAG, se utiliza un FT2232D [3], el cual se encuentra conectado directamente al CPLD para la programación de las FPGAs. Este integrado posee un encapsulado de 48 pines, 48LQFP. A su vez, se dispone un módulo auxiliar, el cual permite la implementación de otro protocolo serie o paralelo, como puede ser una transferencia UART o FIFO.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los principales resultados de la propuesta permiten afirmar que se ha diseñado una plataforma de bajo costo que permitirá realizar cómputo de altas prestaciones oem (a medida). Cada uno de los componentes y la topología de comunicación fueron cuidadosamente seleccionados y planificados para lograr una herramienta de cómputo potente y versátil.

A continuación, se da un listado del costo estimado de los principales componentes del diseño, lo cual permitirá estimar la relación costo/prestaciones en las aplicaciones propuestas. De esta manera se puede tener una noción básica de los costos de producción de la placa en base a las posibles aplicaciones de la misma.

Tabla I. Costo estimado

Componente	Cantidad	USD p/unidad	TOTAL (USD)
XC7K70T	2	137.500	275.00000
Micron Memory	1	3.91000	3.91000
CY7C2263KV18	1	98.7300	98.73000
XC2C128	1	9.15000	9.15000
N25Q12	2	1.62000	3.24000
BPI	1	6.06000	6.06000
FT2232D	1	6.99000	6.99000
		TOTAL	403

**CONCLUSIONES**

En este informe se definen los componentes que forman el proyecto HPRC, así como se analiza de forma breve la cantidad de recursos requeridos por cada periférico. El diseño del proyecto se realizó en base a la topología de 2 FPGAs, con una modificación del ordenamiento de los periféricos para lograr un mayor aprovechamiento de los recursos. Dichos recursos se encuentran muy limitados, por lo que si se desea extender las capacidades del proyecto, es necesario migrar a una versión de FPGA superior, que implica un aumento de costo elevado, en comparación a la alternativa elegida. La presente propuesta abarca la totalidad de los componentes principales del proyecto HPRC, así como su esquema de conexionado. Como tarea a futuro se propone el diseño y fabricación del circuito impreso y la incorporación de una interfaz de comunicación Ethernet. Dicha interfaz requiere la utilización de 4 puertos GTX para su implementación, por lo que se ha asociado únicamente a una de las FPGAs.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Xilinx, "VC707 Evaluation Board for the Virtex-7 FPGA", 2016.
- [2] Micron, "DDR3 SDRAM" - Micron Technology Inc., 2006
- [3] Future Technology, "FT2232D USB JTAGFIFO/UART IC", Datasheet, 2010.
- [4] Xilinx, "CoolRunner-II CPLD Family", datasheet, 2008.
- [5] iMPACT SPI/BPI Flash Programming Support.
- [6] N25Q128 128-Mbit 3 V, multiple I/O, 4-Kbyte subsector erase on boot sectors, XiPenabled, serial flash memory with 108 MHz SPI bus interface.
- [7] 7 Series FPGAs Memory Interface Solutions v1.9 and v1.9a - User Guide.
- [8] 7 Series FPGAs GTX/GTH Transceivers - User Guide

## PLATAFORMA TERMINAL TRANSMISORA PARA EL SISTEMA DCS

Ing. Gerardo E. Sager, Ing. Hugo E. Lorente, Sr. Mauricio Hernandez, Ing. José M. Juárez,  
Ing. Jorge A. Carlotto

Grupo de Investigación y Desarrollo en Comunicaciones Digitales *GrIDComD*  
Calle 48 y 116 2do Piso 1900 La Plata.  
ger@ing.unlp.edu.ar

### Introducción

En este trabajo se describe el desarrollo de una Plataforma Terminal Transmisora (PTT) destinada a ser utilizada con el Sistema DCS (Data Collection System) cuyo receptor está embarcado en el satélite SAC-D/Aquarius.

Si bien este satélite actualmente no está operativo, el diseño de la PTT, permite su utilización en sistemas compatibles como ARGOS y el Sistema de Coleta de Datos (SCD) de Brasil.

Se describirán las características y requerimientos de las PTT, algunos aspectos que fueron tenidos en cuenta durante el desarrollo, las interfaces de usuario y de administración del mismo, resultados obtenidos y algunas aplicaciones donde fueron utilizadas.

### Requerimientos

Las plataformas desarrolladas, deben cumplir con los requerimientos impuestos por los sistemas DCS, ARGOS I y SCD, los cuales solamente difieren en sus frecuencias de operación. Un resumen de estos requerimientos se lista en la tabla 1 a continuación.

Tabla 1

Requerimientos del Sistema		DCS	SCD	ARGOS I
Frecuencia de operación	Medido con precisión $\pm 10^{-8}$	$401.540 \text{ MHz} \leq f_0 \leq 401.560 \text{ MHz}$	401.65MHz	$401.630 \text{ MHz} \leq f_0 \leq 401.680 \text{ MHz}$
Modulación	Desviación de fase	$\pm 1.1 \text{ rd} \pm 0.1 \text{ rd.}$		
	Tiempo de transición de modulación	$100\mu\text{s} \leq R \leq 250\mu\text{s.}$		
	Simetría de la señal de modulación	$\leq 1 \%$		
Potencia Transmitida	En Modo Transmisión	$\leq 34.8 \text{ dBm (3 W)}$		
	Fuera de Modo Transmisión	$\leq -10 \text{ dBm.}$		
	Variación durante la transmisión	$\leq 1 \text{ dB.}$		
	Tiempo de Subida , Tiempo de Bajada	$\leq 5 \text{ ms}$		

Por otra parte los mensajes a transmitir, deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- Duración de la portadora pura 160 ms +/- 2.5 ms. Medido con precisión de +/- 0.4 ms
- Duración de la transmisión: 360 ms +/- 5 ms a 920 ms +/-12 ms en pasos de 80 ms +/- 1 ms. Medido con precisión de  $\pm 0.5$  ms C
- Período de repetición y distribución uniforme alrededor de este período de repetición. Tr desde 60 a 300s Tr +/- 10%. Medido con precisión de +/- 1 sec
- Bit rate: 400 Hz  $\pm 1$  %. Medido con precisión de  $\pm 0.1\%$
- Preambulo 24 bits "FFFE2F" en hexadecimal .
- Longitud de Mensaje: 4 bits para indicar longitudes desde 32 a 256 bits en pasos de 32 bits
- Identificación 20 bits or 28 bits

También deben cumplir con requerimientos funcionales y no funcionales dados por las condiciones de utilización

Entre los requerimientos funcionales podemos mencionar:

- Temperatura de operación (Top)  $-20^{\circ}\text{C} \leq \text{Top} \leq 55^{\circ}\text{C}$ .
- Tensión de Alimentación (Val)  $8\text{V} \leq \text{Va} \leq 15\text{V}$ .
- Protección contra inversión de Polaridad.
- Conector de RF tipo SMA.
- Posibilidad de montaje en riel DIN para utilizar en caja con grado de Protección IP54.

Como requerimientos no funcionales podemos mencionar que la tecnología que se utilice para su implementación debe ser accesible para la industria nacional, debiendo importarse solamente los componentes electrónicos necesarios, para esto se decidió realizar la implementación sobre una placa de circuito impreso de dos capas con agujeros metalizados (PTH "Plated Thru Hole") y utilizar componentes de montaje superficial con tamaño mínimo 0805.

## Diseño e implementación de hardware

### 1. Diseño electrónico

Con base en los requerimientos mencionados se decidió realizar un diseño electrónico de la Plataforma que consta principalmente de tres secciones, como se aprecia en la Fig. 1.

- Una sección analógica de Radio Frecuencia que incluye una etapa generadora de señal, una etapa excitadora y una etapa de potencia, con una red de adaptación al elemento irradiante.
- Una sección digital que permite la interfaz con adquirentes de datos, control del sistema, y modulación de la señal transmitida.
- Una sección de alimentación, bajo el control de la etapa digital, que permite obtener un sistema con bajo consumo.

#### a) Sección de Radio Frecuencia

La sección generadora de señal, se basa en un TCXVCO (Oscilador a cristal, compensado en temperatura y de frecuencia variable) que a su vez sirve como frecuencia de referencia para un sintetizador programable, que permite a su vez obtener la frecuencia de transmisión deseada. El manejo de la tensión de control de este TCVCXO, también permite obtener la modulación de fase necesaria para la transmisión de los datos digitales.

La etapa excitadora permite que la señal alcance el nivel necesario para que la etapa de potencia llegue a entregar la potencia de diseño que se ha fijado en 1 W (30 dBm)

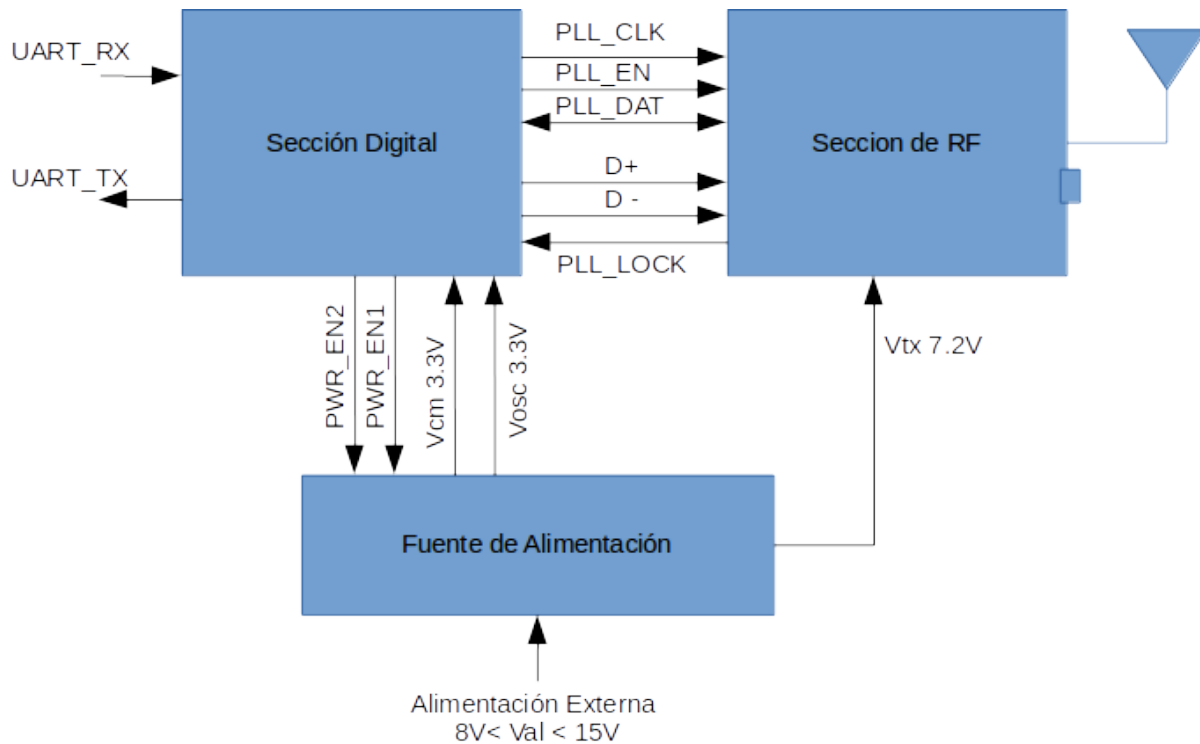


Figura 1

#### b) Sección Digital.

Esta sección está basada en un microprocesador de 8 bits de la familia HCS08 en un encapsulado de 20 terminales tipo TSSOP. Este posee modos de bajo consumo, una UART integrada, posibilidad de generación de señales PWM, oscilador a cristal de 32.768 KHz, interfaz SCI y tres puertos GPIO. Todas estas características se utilizan en el diseño planteado. Algunas de las tareas que realiza el microprocesador son:

- Control de la fuente de alimentación.
- Recepción e interpretación de comandos recibidos a través de la UART y generación de respuestas.
- Formato de mensajes a transmitir, incluyendo la generación de checksums, y almacenamiento temporario.
- Almacenamiento de parámetros de configuración en una memoria EEPROM serie, controlada por una interfaz SCI.
- Generación mediante PWM de las señales necesarias para la modulación
- Configuración de interfaces UART y generación de señales de configuración para el sintetizador.
- Medición de tiempo para la transmisión de los mensajes a intervalos preconfigurados.
- Manejo de un modo de administración que permite la configuración de parámetros únicos de la estación como ID, intervalo de repetición y frecuencia de operación. En este modo además se pueden utilizar comandos especiales para ensayo y calibración de la plataforma.

#### c) Fuente de Alimentación.

La fuente de alimentación provee tres alimentaciones distintas a partir de la entrada de alimentación externa. Una de las alimentaciones provee 3.3 V regulados destinados al funcionamiento del microprocesador. Esta alimentación se mantiene siempre activa, ya que se pueden utilizar los modos de bajo consumo del microprocesador. Otra de las alimentaciones, de 3V regulados se dedica exclusivamente para proveer tensión al

TCVCXO, lo que optimiza la estabilidad en frecuencia del mismo, la activación de esta fuente se realiza bajo control del microprocesador solo cuando debe realizarse la transmisión de un mensaje. Por último, se tiene una alimentación de 7.2V regulados, destinada a proveer tensión a la etapa de RF, tanto excitadora como de potencia. La alimentación de 7.2 V debido a la necesidad de provisión de potencia está implementada como fuente switching, mientras que las de 3.3V y la de 3V están implementadas mediante reguladores lineales.

## 2. Diseño mecánico.

Teniendo en cuenta que la PTT debe ser lo suficientemente robusta, se ha realizado un diseño mecánico que permite una fácil instalación aún por parte de personas sin conocimientos técnicos detallados.

## 3. Diseño térmico

Asimismo se ha tenido en cuenta que las Plataformas podrían ser instaladas en ambientes extremos como desiertos, montañas, glaciares, etc, por lo que se ha prestado especial atención a los componentes e interfaces térmicas. A tal fin se ha maximizado el área de plano de tierra de la placa e circuito impreso, y se han perforado múltiples vías para vincular térmicamente los elementos que deben disipar calor con dicho plano, previendo que el gabinete y el montaje mecánico del gabinete actúen en conjunto como disipador térmico. Para que el circuito funcione a bajas temperaturas satisfactoriamente se han seleccionado componentes adecuados para ese fin.

## Diseño e implementación de software

### 1. Modos de Operación

El software prevee dos modos de operación, Modo normal y Modo Administración

#### a) Modo Normal

En este modo, una de las tareas es la adquisición de comandos, la cual se dispara a través de una interrupción producida cuando se recibe un carácter en la UART.

Otra de las tareas es la activación de la transmisión. Como esta tarea genera la modulación de los datos a ser transmitidos en una secuencia precisa y restringida en tiempo, deshabilita todas las demás tareas. Esto no es un gran problema, ya que previamente se genera un mensaje (BUSY) que se transmite por la UART, mediante el cual un dispositivo externo que envíe comandos puede determinar que la tarea de adquisición de comandos no estará activa hasta que la plataforma envíe otro mensaje (FREE). La tarea de transmisión de datos es configurable para producir transmisiones espaciadas desde 2 segundos hasta 300 segundos entre sí, o bien bajo comando externo.

Los comandos habilitados en modo normal permiten distintas configuraciones, como habilitar/deshabilitar la transmisión repetitiva, cargar/borrar un nuevo dato a transmitir, seleccionar conmutar entre dos mensajes distintos a ser transmitidos, cambiar la identificación de plataforma, etc

#### b) Modo Administración

En este modo se pueden configurar algunos parámetros de la plataforma que no es conveniente modificar durante el funcionamiento normal, como el baud rate de la UART, período de repetición de la transmisión, Número de serie, frecuencia de transmisión, entre otros.

El procedimiento para ingresar en modo administración involucra la conexión y desconexión de un jumper durante un cierto período de tiempo a partir del reset, de manera que no pueda ingresarse a este modo accidentalmente por error de operación y habilita un conjunto de comandos privilegiados no accesibles en modo normal, que a permiten operaciones destinadas a realizar ensayos y calibración de la plataforma



## Funcionamiento de la Plataforma

Luego del reset, se verifica si se ha realizado la secuencia de operaciones destinada a entrar al modo Administración. Si este es el caso, la tarea de adquisición de comandos queda a la espera de los mismos y reacciona según el comando recibido.

En caso contrario se entra al funcionamiento normal, donde luego de proceder a la inicialización de los distintos periféricos, y si está habilitada la transmisión periódica de datos, se verifica un timer que le indica el instante de transmisión. Cuando se alcanza dicho instante, se emite un mensaje BUSY por la UART y se genera la secuencia de señales que dará lugar a la transmisión, la cual puede tener una duración comprendida entre 360ms y 920ms dependiendo de la cantidad de datos útiles a transmitir (32 a 256 bits). Una vez finalizada la transmisión, se reinicia el timer y se envía el mensaje FREE por la UART, quedando el receptor en condiciones de recibir nuevos comandos. Cabe destacar que cuando no se generan las señales a transmitir, el único elemento que consume energía es el microprocesador, ya que el resto de las fuentes se hallan deshabilitadas.

Un punto de interés es la implementación del modulador que se describe a continuación.

## Funcionamiento del modulador

Es necesaria la generación de una señal de tipo Manchester (biphase L) con desviaciones de fase de  $\pm 1.1$  radianes. Asimismo es necesaria la generación de una portadora sin modular durante un lapso de 160ms.

Para obtener las desviaciones de fase necesarias, se opera sobre la frecuencia del VCTCXO. Genéricamente puede considerarse que una variación tipo pulso en la frecuencia de referencia, produce una rampa de fase que se estabiliza en un valor fijo una vez finalizado el pulso. De esta manera, si la rampa es lo suficientemente rápida, lo que equivale a un pulso lo suficientemente angosto, la variación de fase puede aproximarse como un escalón. Eligiendo adecuadamente los tiempos y las frecuencias involucradas, se puede llegar a la especificación de  $\pm 1.1$  rad como variación de fase. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de lo expuesto

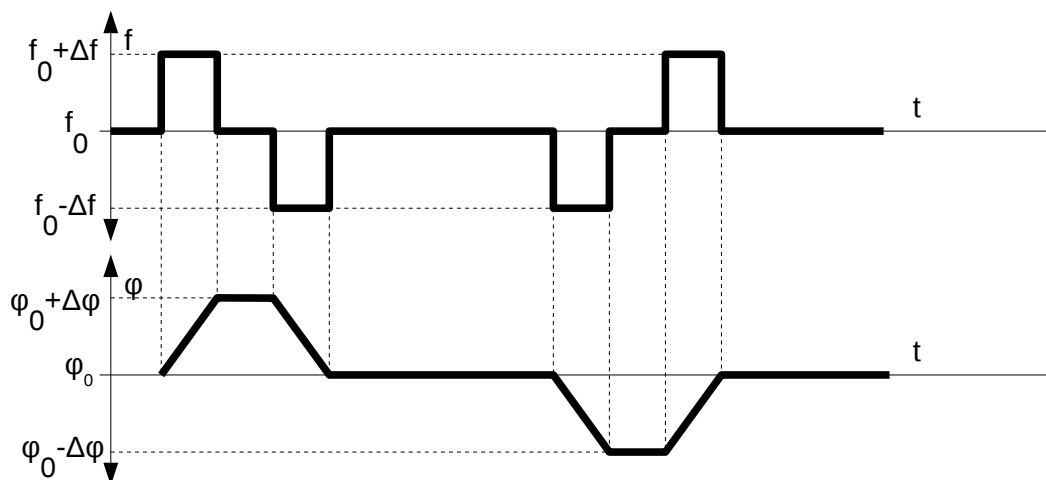


Figura 2

Para poder lograr las desviaciones de frecuencia necesarias, se proveen tres tensiones diferentes al VCTCXO, a través de un multiplexor analógico, de manera tal que proporcionen las tensiones necesarias para producir tres frecuencias distintas:  $f_0$ ,  $f_0 + \Delta f$  y  $f_0 - \Delta f$ .

Según la transición necesaria, dos señales digitales provistas por el microcontrolador, seleccionan una de las tres tensiones, durante un tiempo que se controla mediante el generador PWM.

## Resultados.

Se procedió a realizar prototipos de cada una de las secciones para poder validar el diseño, y luego se diseñó la placa de circuito impreso doble faz. Luego de armado el circuito se ajustaron las tensiones de modulación mediante sendos potenciómetros multivuelta, y se ajustó la etapa de salida para obtener máxima potencia aprovechando los comandos de calibración del modo administrador

Se realizó una prueba exhaustiva de los comandos de software en modo normal, verificando la funcionalidad.

También se realizaron ensayos a las temperaturas extremas de  $-20^{\circ}\text{C}$  y  $55^{\circ}\text{C}$  para verificar que el VCO del sintetizador cubriera el rango necesario de frecuencia en esas condiciones. Por último se conectó a una antena transmisora y se verificó la recepción de las transmisiones por parte del receptor DCS embarcado a bordo del satélite SAC-D Aquarius. En la Figura 3 se muestran fotografías de la plataforma dentro y fuera de su caja.

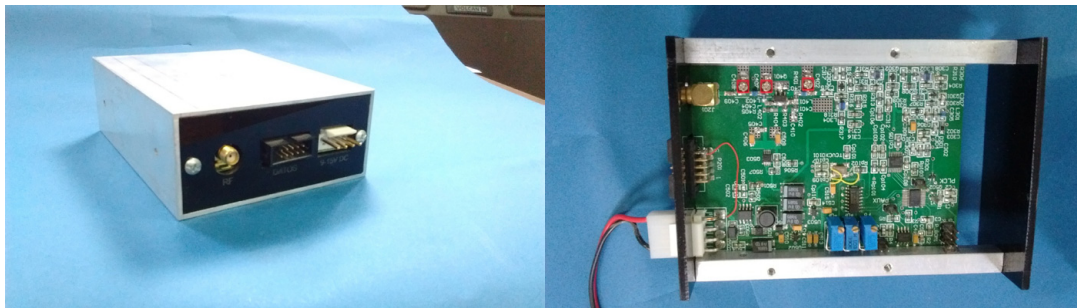


Figura 3

## Conclusiones.

Se han implementado 12 plataformas, bajo un convenio con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales, las que fueron distribuidas por la CoNAE a distintos organismos para que realicen prueba de transmisión de variables ambientales, pudiéndose destacar la instalación de una de ellas en el Glaciar Gordon, próximo a la base Marambio en la campaña antártica 2013. Esta estación transmitió datos de temperatura y humedad entre febrero y junio de 2013, habiendo cesado su transmisión por la caída de la antena debido a la rigurosidad del clima.

Como perspectivas a futuro se ha seguido trabajando en el tema con los siguientes objetivos:

- Migración a un microprocesador más potente que permita también la adquisición de datos ambientales sin necesidad de un adquisidor externo.
- Realización de un receptor de mano para verificar la instalación de las plataformas.
- Adecuación de una interfaz con estaciones meteorológicas estándar.
- Desarrollo de un sistema de ensayo y calibración automático o semiautomático

## Bibliografía

CNES "Certification of PTT and PMT" AS3-SP-516-2281-CNES Ed.2

Yamaguti W., Orlando V., Pereira S. "Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais: Status e planos futuros" XIV Simposio Brasileiro de sensoramiento Remoto, Natal, Brasil 2009

Sager, G. Lorente, H, Mercado, G, "SAC-D Data Collection System—Instrument. Interface Control Document as built" CONAE Document: SD-335-0077-ver6. May 15, 2009

## SISTEMAS DE COMUNICACIÓN PARA NECESIDADES ESPECIALES: ARTICULACIÓN ENTRE EXTENSIÓN, DOCENCIA E INVESTIGACIÓN

González Mónica L., Gialonardo José I., Ferrari Flavio A.

UIDET UNITEC, Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 48 y 116, La Plata, Argentina, [dispos@ing.unlp.edu.ar](mailto:dispos@ing.unlp.edu.ar)

### INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos de las últimas décadas y, en particular, el desarrollo de la Microelectrónica, la Informática y las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC), han permitido producir numerosos dispositivos para favorecer el desenvolvimiento de personas con discapacidad o necesidades especiales. Los productos tecnológicos denominados ayudas técnicas o tecnologías de apoyo permiten facilitar actividades, compensar deficiencias o minusvalías y mejorar la accesibilidad para estos sectores específicos de la población. Estas tecnologías pueden incluir cualquier producto que exista en el mercado incluyendo equipos, instrumentos, dispositivos y software. La producción de dispositivos a gran escala, que permitiría disminuir costos, es difícil de sostener debido a que el tipo y grado de discapacidad son únicos en cada persona. Esto causa que el diseño único resulte muchas veces ineficaz debido a las diferencias individuales de los usuarios.

En Argentina el desarrollo de ayudas técnicas es un área muy poco desarrollada, los productos de este tipo deben ser importados resultando en artículos de un alto valor económico, y que deben ser ajustados a las necesidades de cada usuario. Al ser un área de investigación y desarrollo con un alto grado de vacancia involucra la investigación, el desarrollo y el diseño de nuevas estrategias de capacitación y formación profesional.

La evolución de la arquitectura de los sistemas de instrumentación basados en sistemas embebidos con Microcontroladores, Microprocesadores, Procesadores de Señales (DSP) y Sistemas Programables Digitales (FPGA) y Analógicos (FPAA) para el desarrollo de Interfaces y adaptación de señales, permiten generar distintos productos tecnológicos a medida y de costo reducido que pueden aplicarse al desarrollo de dispositivos de ayuda para discapacidad. Desde la Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia para la Calidad de la Educación en Ingeniería con orientación al uso de TIC (UIDET UNITEC) y a partir del Proyecto de Investigación: Electrónica e Informática aplicada a la instrumentación para NEE (Necesidades Educativas Especiales), se ha desarrollado instrumentación de última generación y de bajo costo y diversas herramientas de ayudas técnicas. El Proyecto estuvo enfocado en criterios de I&D+i (Investigación, Desarrollo e Innovación) utilizando diversas tecnologías y sistemas de hardware y software libre y/o comercial.

La necesidad del Proyecto surgió a partir de vínculos con organizaciones que atienden las necesidades, terapias y educación de personas con discapacidad de todo tipo y de casos particulares que se acercaron a UNITEC en forma individual.

Como característica distintiva la UIDET UNITEC es un grupo multidisciplinario formado por profesionales universitarios de diferentes áreas además de la Ingeniería. La conjunción de saberes permite desarrollar la asistencia técnica buscando el camino óptimo. Se propone trabajar desde la Extensión Universitaria como actividad multifacética articulando a la Investigación y a la Docencia, tal como se estableció en los pilares fundacionales de la Universidad Nacional de La Plata.

El desarrollo y ejecución del Proyecto permitió la incorporación de alumnos de grado de carreras de Ingeniería que realizaron sus primeras actividades en el campo de la I+D a través

de las Prácticas Profesionales Supervisadas o el Trabajo Final de carrera. Se logró cumplir con la articulación entre Investigación, Extensión y Docencia, formando recursos humanos con capacitación en temas de instrumentación aplicada a discapacidades, aptos para abordar problemas de alta complejidad y contribuir positivamente al vínculo con la sociedad aplicando criterios apoyados en la Responsabilidad Social Universitaria.

## **PARTE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

La Investigación y Desarrollo (I+D) son dos actividades científicas y tecnológicas de gran valor porque implican la creación de nuevo conocimiento, elemento clave para el progreso general de la sociedad. Si a ellas se les añade la aplicación práctica de los progresos a través de la Innovación (i) tendremos el ciclo completo de un sistema de investigación. Se considera a la innovación como el conjunto de etapas científicas, tecnológicas, financieras y/o comerciales que permiten introducir productos, servicios, procesos o procedimientos nuevos o mejorados.

El cumplimiento del Proyecto abarcó todos y cada uno de estos aspectos:

- Conocimiento profundo y exhaustivo de la problemática asociada a la Instrumentación y desarrollo de dispositivos para mejorar el acceso de las personas con discapacidad al entorno
- Diseño, prueba y construcción de los equipos de instrumentación según necesidades específicas de usuarios con distintos tipos de discapacidad.
- Selección de software y adaptación a los requerimientos de los equipos desarrollados
- Preparación de los usuarios en el uso de las tecnologías desarrolladas.
- Desarrollo de competencias en los alumnos de grado de Ingeniería que participan en el Proyecto en el cumplimiento de Trabajo Final de carrera o Práctica Profesional Supervisada
- Detección de fallas y ajustes en los dispositivos desarrollados.
- Evaluación del impacto de la aplicación de los dispositivos producidos en las personas con diferentes discapacidades con el objetivo de mejorar su calidad, disponibilidad y usabilidad.
- Determinación de las características de calidad y seguridad que aseguran el bienestar de los usuarios potenciales.

La metodología utilizada en el desarrollo del Proyecto se respaldó en las siguientes hipótesis de trabajo:

- Los desarrollos y adaptaciones a partir de las nuevas tecnologías de instrumentación introducen mejoras en la calidad de vida de los sujetos involucrados.
- Los dispositivos realizados deben poder desarrollarse a un costo menor que los existentes en el mercado nacional e internacional.
- El uso de las nuevas tecnologías aplicadas en la instrumentación para necesidades especiales requiere un estudio que permita delimitar su alcance y rango de aplicación.
- El campo curricular de la instrumentación y desarrollo de tecnologías para necesidades especiales requiere de una definición propia y diferenciada en la Instrumentación general y la Ingeniería.
- La difusión del uso correcto de los resultados requiere nuevos enfoques en la capacitación sobre el uso de los dispositivos adaptados, aplicaciones reales y simulaciones.

Para el desarrollo de la instrumentación, y de acuerdo a cada tipo de discapacidad, se analizaron los antecedentes, dispositivos comerciales o experimentales similares. Se utilizó el concepto de diseño centrado en el usuario, sin dejar de lado el diseño de un sistema versátil universal. En este sentido, en los países europeos es muy común el uso de la perspectiva denominada “diseño para todos” o “diseño universal”, según el cual se pretende realizar un diseño de características amplias donde se tengan en cuenta las necesidades del mayor número de usuarios posibles desde las primeras fases de las etapas de diseño de cualquier tipo de producto, reduciendo el costo de producción al mínimo posible. En el diseño de dispositivos para usuarios con necesidades especiales la aplicación del diseño para todos puede crear un

problema, ya que no puede garantizar la accesibilidad en numerosos casos de discapacidad, siendo necesarios dispositivos especialmente acondicionados a las necesidades propias del usuario, debido principalmente a que todas las discapacidades son únicas, y un mismo tipo de discapacidad se puede encontrar en diferentes grados en distintas personas. Por ello durante la ejecución del Proyecto se mantuvo un vínculo directo con los destinatarios de las aplicaciones desarrolladas a fin de optimizar las fases de diseño.

Dentro de las tecnologías de ayuda se ha trabajado con Tecnologías de acceso a la computadora y Sistemas de Comunicación Aumentativa y Alternativa (CAA). Esta categoría abarca subtipos de discapacidad, siendo necesaria una aplicación específica a cada tipo particular, ya que las diversas patologías pueden ser transitorias o permanentes. En el desarrollo del Proyecto de Investigación se han tratado las alteraciones motrices y de lenguaje, utilizando a la tecnología como medio para resolver las necesidades de personas afectadas por la comunicación con su entorno, en particular aquellas que por su afección no pueden acceder a un código verbal-oral de comunicación, como es el caso de personas afectadas por afasias.

Los sistemas de signos y las ayudas técnicas para la comunicación aumentativa pueden ser de diversos tipos ya que deben adaptarse a las necesidades particulares según cada patología. Para este tipo de ayudas de CAA se han desarrollado en la UIDET UNITEC varios dispositivos que fueron realizados por alumnos que efectúan sus Trabajos Finales de carrera o que deben cumplimentar las Prácticas Profesionales Supervisadas. En este último caso se ha realizado dentro de los espacios de trabajo de la UIDET UNITEC y son mayormente desarrolladas por alumnos de Ingeniería en Computación. Dentro de los lineamientos generales del Proyecto de Investigación se han realizado varios dispositivos de CAA. Las Figuras 1 y 2 muestran dos Comunicadores Pictográficos de bajo costo realizados como Trabajo Final de la carrera de Ingeniería en Electrónica. El Pictograma es una herramienta muy útil para algunas patologías que afectan la comunicación. Los pictogramas son signos que representan figuras o símbolos y han sido utilizados desde hace mucho tiempo para expresar ideas, conceptos, emociones, etc. Es un recurso básico para expresar y transmitir el pensamiento a un interlocutor por personas que presentan dificultades en la comunicación oral y escrita. Pueden ser muy simples o sofisticados; en este último caso constituyen dispositivos de “alta tecnología”.



Figura 1



Figura 2

El objetivo principal de los Comunicadores Pictográficos desarrollados fue facilitar la comunicación a un usuario que no utiliza el lenguaje oral ni escrito. El sistema dispone de espacios para colocar tarjetas pictográficas, con imágenes que representan conceptos a comunicar. El usuario puede elegir la tarjeta cuyo concepto desea comunicar, a través de la activación de un switch (conmutador) conectado al aparato, y la imagen queda identificada por



un indicador luminoso. De acuerdo a las posibilidades del usuario y la evaluación del equipo de profesionales que trabaje con él, el comunicador se puede configurar para operar con distintas modalidades de selección (la forma y secuencia de encendido de las luces), a distintas velocidades, y con o sin una señal sonora de aviso. El comunicador de la Figura 1 se montó en una estructura de acrílico en un tablero de fibra. Como característica de diseño se optó por una forma rectangular con las dimensiones de una hoja A4, donde se pueden colocar 12 tarjetas de 5,5 cm. de lado. El comunicador cuenta con 8 modos de operación, según las especificaciones iniciales, así como la posibilidad de habilitar/deshabilitar una señal sonora. El equipo cuenta con dos modos de alimentación: con batería recargable o conexión a la red eléctrica.

El Comunicador visual y de habla artificial digital es otro desarrollo realizado como Trabajo Final de la carrera de Ingeniería en Electrónica diseñado a requerimiento de Juan Cobeñas quien padece Parálisis Cerebral y se encuentra entrenado en el uso de switches junto con un sistema de comunicación basado en un código alfabético creado especialmente para él. El código está formado por un conjunto ordenado de letras y colores. Sobre la base de estas especificaciones se trató de reproducir una interfaz gráfica implementada en un dispositivo de pantalla táctil (notebook) que utilizara el código conocido por Juan, visualizando las palabras en pantalla y con un sintetizador de voz para escuchar oralmente lo escrito. El resultado del proyecto posee un registro de la propiedad intelectual del software desarrollado (Intercom 1.3 – Comunicador Digital para casos de Parálisis Cerebral (2012)). El dispositivo ha permitido mejorar la calidad de vida del usuario, facilitando la comunicación con su entorno social.

En la Figura 3 se muestra el aspecto de la forma de la hoja de papel manejada por el usuario y en la Figura 4 la interfaz gráfica desarrollada que reproduce el mismo código sobre una pantalla táctil.

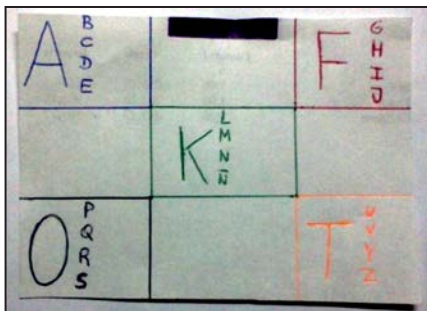


Figura 3

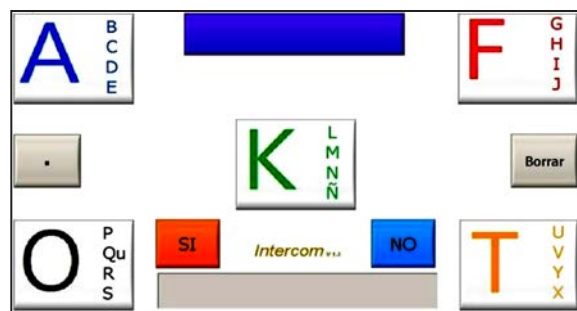


Figura 4

Sobre la base del Comunicador visual Intercom 1.3 y como cumplimiento de las PPS de alumnos de Ingeniería en Computación se desarrolló el Comunicador en plataforma Android. De este modo se trató de convertir los comunicadores para su uso universal en PC, Tablet o Celular. Para desarrollar la interfaz de usuario se consideraron las medidas físicas de la pantalla y las medidas de todos los componentes de la aplicación, botones, cuadro de texto, etc. y su ubicación dentro de la pantalla. Se calcularon proporcionalmente a los parámetros de altura y ancho de la pantalla, logrando un valor porcentual de los mismos adaptados a los distintos sistemas de reproducción. La Figura 5 muestra su implementación en un celular.

Bajo los mismos conceptos se desarrolló un comunicador utilizando el lenguaje JAVA. Igual que el anterior posee un visualizador de palabras en pantalla, un sintetizador de texto a voz audible, teclas para salir de la aplicación, para dar respuestas rápidas (SI-NO), de puntuación y para almacenar lo escrito en pantalla. La Figura 6 muestra el desarrollo del Comunicador JAVA sobre una Tablet.



Se encuentra en desarrollo el comunicador denominado Accesiblet, comunicador pictográfico para plataforma Android para ser utilizado en un celular. Utiliza una interfaz de tipo tabla (Interfaz de acción) donde se ubican los botones que muestran los pictogramas (imágenes) de distintas acciones u objetos que el usuario utilizará, y mediante los cuales irá evolucionando hasta llegar a la selección de la opción deseada. Dependiendo de la configuración se genera un texto en pantalla y/o se puede utilizar un sintetizador de voz, que de nombre al objeto seleccionado.



Figura 5

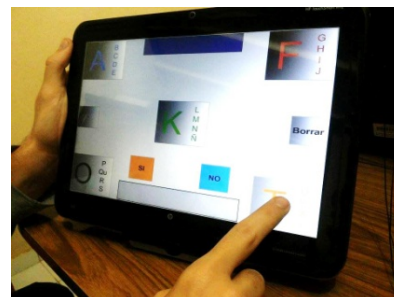


Figura 6

## CONCLUSIONES

La ejecución del Proyecto de Investigación permitió actuar en un área de vacancia facilitando a usuarios con necesidades especiales dispositivos de bajo costo diseñados de acuerdo a sus necesidades específicas de comunicación. Se trabajó en forma multidisciplinaria: ingenieros, terapeutas, educadores especializados y alumnos. En el trabajo conjunto se determina el reconocimiento de las necesidades a cubrir para desarrollar los recursos con las tecnologías apropiadas o la adaptación de los dispositivos según las necesidades específicas. El desarrollo del proyecto con los alumnos de Ingeniería Electrónica e Ingeniería en Computación permitió articular la Investigación y la Extensión con prácticas pedagógicas, integrando la educación universitaria con necesidades de la comunidad, orientando a los alumnos hacia una futura práctica profesional comprometida con la sociedad de la que son parte.

Los dispositivos desarrollados recibieron una Mención de Honor en el Premio a la Innovación 2015, Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de La Plata, y el premio Ciencia y Comunidad 2015, Dr. Rodolfo Ugalde, en el rubro Desarrollo Social y/o Salud, otorgado por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, en setiembre de 2016.

## BIBLIOGRAFÍA.

- Basil, C. (1998). Introducción. Sistemas de signos y ayudas técnicas para la comunicación aumentativa y la escritura (pp. 1-5). Recuperado de <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/19162> (3/2013)
- CEAPAT, Centro Estatal de Autonomía Personal y Ayudas Técnicas (España). Recuperado de <http://www.ceapat.org> (12/2012)
- Czerwien J. C., Proyecto Final de Ingeniería Electrónica: Intercomunicador Digital para casos de Parálisis Cerebral, Dto. Electrotecnia. FI UNLP
- Portal Aragonés de la Comunicación Aumentativa y Alternativa. Recuperado de <http://www.catedu.es/arasaac> (12/2012)

Tenti M. y Santillán J., Proyecto Final de Ingeniería Electrónica: Comunicador pictográfico para comunicación aumentativa y alternativa, Dto. Electrotecnia. FI UNLP

Sarubbio N., Toris A., Gialonardo J. I., Ferrari F.A., Rapallini J. A., Cordero M. C., Comunicador táctil Java. Comunicador para personas con parálisis cerebral severa, VI Congreso de Microelectrónica Aplicada uEA 2015

Cuvelo L., Gelsi F., Gialonardo J. I., Blasetti F. H., Ferrari F. A., Cordero M. C., Comunicador Android. Comunicador para personas con parálisis cerebral severa, VI Congreso de Microelectrónica Aplicada uEA 2015

González M. L., Ferrari F. A., Isidori A. N. y Sanmarco E. D., Desarrollo de un sistema de comunicación alternativa y aumentativa en un proyecto de articulación Escuela Media-Universidad, TE&ET 2015

## IMPLEMENTACIÓN DE UN LABORATORIO DE MARCHA DE BAJO COSTO

Ferrari, Flavio A.<sup>1</sup>; Vera, José O<sup>1</sup>.; Cordero, María C.<sup>1</sup>; Rapallini, José A.<sup>2</sup>; Osio, Jorge<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UIDET UNITEC y <sup>2</sup>UIDET CeTAD, Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 48 y 116, La Plata, Argentina, [corderomc@gmail.com](mailto:corderomc@gmail.com)

### INTRODUCCIÓN

El estudio del movimiento humano y más concretamente de la marcha ha sido de particular interés desde tiempos remotos, generando el desarrollo de diferentes métodos para su estudio. Con el avance de la tecnología, los sistemas de cómputo y los avances en la informática se han desarrollado sistemas para análisis del movimiento humano que son de gran ayuda para el diagnóstico y terapéutica de diferentes patologías.

El desarrollo de un Laboratorio de marcha de bajo costo para análisis del movimiento surge a requerimiento de la Asociación pro Rehabilitación Infantil La Plata (APRILP), entidad sin fines de lucro que fue fundada en 1959 para enfrentar las consecuencias de importantes epidemias de poliomielitis. Actualmente es un centro de diagnóstico, derivación y rehabilitación especializado en patologías del sistema neurolocomotor.

El desarrollo de este equipamiento constituye un hecho altamente relevante puesto que en nuestro país sólo existe un Laboratorio de Marcha con fines diagnósticos y terapéuticos, que se encuentra bajo el ámbito de FLENI (Fundación para la Lucha contra las Enfermedades Neurológicas de la Infancia) en la localidad de Escobar [1, 2].

El valor comercial de uno de estos equipos supera los 150.000 euros, por lo que implementar un Laboratorio de Marcha de bajo costo, modular, replicable y escalable, constituye un proyecto de relevancia que permitirá el acceso a un gran número de pacientes.

### Proceso de adquisición de datos para análisis del movimiento

Como se ha mencionado, el análisis instrumentado de la marcha corresponde al análisis de la condición clínica de marcha de una persona mediante el uso de tecnología altamente especializada.

Al paciente se le colocan marcadores pasivos reflectantes sobre la piel, elegidos como puntos de referencia óseos y, en algunos casos, electrodos de superficie y/o aguja para registro de actividad electromiográfica y otros sensores de variables fisiológicas, de acuerdo a protocolos normalizados. Las mediciones son realizadas por el sistema, mientras el paciente camina libremente a lo largo del sendero de marcha del laboratorio.

El medio de medición del Laboratorio de Marcha está constituido generalmente por un sistema opto-electrónico de cámaras infrarrojas y de videos convencionales, ubicadas en el camino de marcha, plataformas de fuerzas empotradas en el piso o pedígrafos y un equipo de registro de electromiografía dinámica. Disponen además de tecnología para el cálculo del gasto energético de la marcha y medición de fuerzas sobre el pie para estudio de presiones plantares. El sistema de medición del laboratorio de marcha debe ser calibrado diariamente, recomendándose hacerlo para cada estudio a realizar. Este aspecto es fundamental para asegurar la calidad de las adquisiciones.

La información obtenida en el análisis de marcha debe interpretarse en conjunto y comparada con la base de datos de individuos normales de cada laboratorio para identificar las anomalías y postular las causas que las determinan.

La información obtenida es la siguiente:

a) Parámetros temporo-espaciales: Se refiere al cálculo de indicadores tales como la velocidad de marcha, largo de los pasos, cadencia (número de pasos por minuto), ancho del paso y

duración de las fases del ciclo de marcha, entre otros. Estos son calculados en base a los datos obtenidos de la posición de los marcadores reflectantes.

b) Cinemática: Durante la adquisición el paciente camina libremente a lo largo de la senda de marcha del laboratorio, el cual está rodeado por un sistema especial de captura tridimensional compuesto por múltiples cámaras especializadas conectadas a un computador central. Estas cámaras poseen una lente central de captura y celdas periféricas que emiten radiación infrarroja. La radiación infrarroja emitida, es reflejada por los marcadores ubicados sobre la piel del paciente y capturada por la lente central de las cámaras del laboratorio. El conjunto de imágenes provistas por las cámaras es integrado y procesado por un software instalado en una PC para la obtención del movimiento articular tridimensional. El análisis cinemático define los ángulos articulares y el movimiento de los segmentos en el espacio.

c) Cinética: Corresponde a la medición de las reacciones producidas entre la fuerza ejercida por el peso del individuo sobre la tierra y la fuerza de reacción del piso (GRF). Contempla la medición de los momentos o torques y potencias articulares internos, el punto de aplicación de la GRF bajo el pie y sus tres componentes; vertical, medio lateral y anteroposterior. Aporta información complementaria a la cinemática al definir las causas que determinan el movimiento articular a lo largo del ciclo de la marcha, es decir, qué grupo muscular es el predominante en cada momento y que tipo de contracción muscular está ejerciendo; excéntrica o de frenado o concéntrica para generación de potencia. Define además la presencia de sobrecargas articulares anormales. Se adquiere a través de plataformas de fuerza empotradas en el piso.

**Ciclo de la Marcha:** El Ciclo de la Marcha es el conjunto de acciones realizadas y fenómenos producidos desde el contacto del talón con el suelo hasta el siguiente contacto del mismo talón con dicho plano de apoyo con el fin lograr el desplazamiento del peso corporal desde un punto a otro, de forma bípeda. Existen fases de apoyo y oscilación, iniciales medias y finales. Fig. 1.

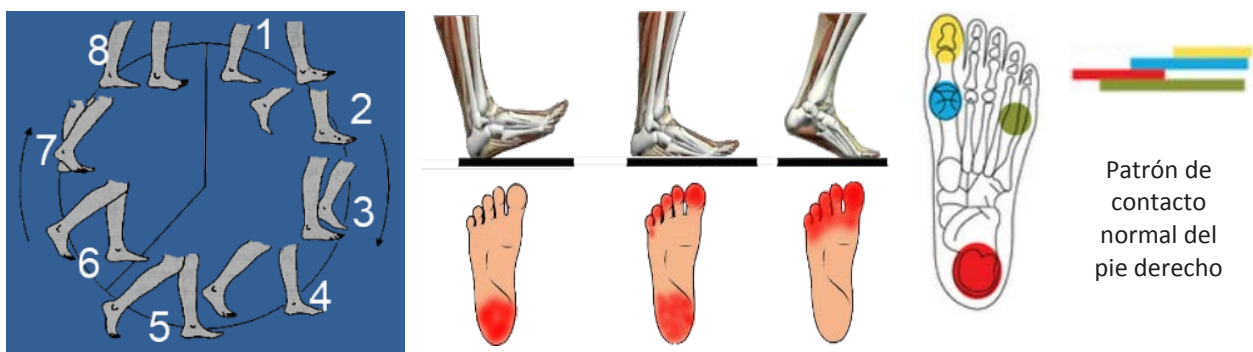


Figura 1. Fases del ciclo de marcha y Distribución de presiones plantares en la marcha

**Distribución de Cargas en el Pie:** La distribución de presiones en la planta del pie cambia según la etapa del paso que se observe, tal como se muestra en la Figura 1.

Los estudios estáticos de las huellas plantares y la distribución de cargas responden a diferentes técnicas de medición ampliamente utilizadas, entre ellas: *Pedigrafía*, *Fotopodograma*, *Radiofotopodograma*, *Podoscopio* y *Escáner Podológico*. La tecnología utilizada para los estudios dinámicos es la Plataforma de Baropodometría (con y sin reconstrucción 3D).

## PARTE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La implementación del Proyecto del Laboratorio de marcha de bajo costo para APRILP, es de característica bianual y se lo ha dividido en tres módulos: Digitalización de la pisada, Digitalización de la marcha y Adecuación edilicia del espacio físico.

## Digitalización de la pisada: Desarrollo de Instrumentación Electrónica para Relevamiento de Huellas Plantares en Tiempo Real

Para el desarrollo de la instrumentación, denominada Pedígrafo digital, que permita el relevamiento de las huellas plantares en tiempo real, se deben tener en cuenta las siguientes especificaciones:

- Relevamiento y Reconstrucción de la huella plantar en Tiempo Real.
- Superficie sensible suficientemente amplia
- Resolución espacial apropiada
- Comunicación con una computadora
- Alta velocidad de transferencia de datos
- Interfaz de fácil utilización
- Visualización de presiones en forma relativa
- Reproducción y Almacenamiento post relevamiento
- Utilización de materiales de alta disponibilidad en Argentina
- Bajo Costo

*Elección de los sensores:* Las especificaciones que son clave para el rendimiento del sensor de presión a elegir incluyen los siguientes parámetros: linealidad, histéresis, rango de presión, sensibilidad a la temperatura, resolución, Precisión vs. Exactitud y robustez.

Luego del estudio de las tecnologías disponibles en el mercado se optó por los sensores resistivos que responden a los requisitos exigidos. La resistencia equivalente formada entre los electrodos y la goma conductiva depende total e intrínsecamente de la geometría empleada y es por este motivo que se ensayaron variantes en cuanto al material, al espesor y forma de la goma, así como también separación entre pistas y ancho de las pistas que conforman los electrodos. Los ensayos tuvieron lugar en el Laboratorio del Grupo de Ensayos Mecánicos Aplicados de la FIUNLP. Allí se ensayaron diferentes configuraciones geométricas: forma cuadrada o redondeada, tipo peine, de pistas angostas o anchas, de distribución centrada, etc. Se probaron las gomas conductoras marca AVIGOM en espesores de 1 mm y 3,5 mm. Se estudiaron los resultados de los gráficos de resistencia y conductancia en función de la presión para la elección final.

Se decidió utilizar la goma conductiva de AVIGOM, de 3.5mm de espesor, redonda y el electrodo de Forma Redondeada, distribución Tipo Peine y Pista Ancha.

*Método de medición:* En las Figuras 2 y 3 se muestra el diagrama en bloques del sistema de medición para relevamiento de la huella plantar en tiempo real. Se realiza el barrido de la matriz de sensores para obtener la totalidad de la digitalización de la pisada.

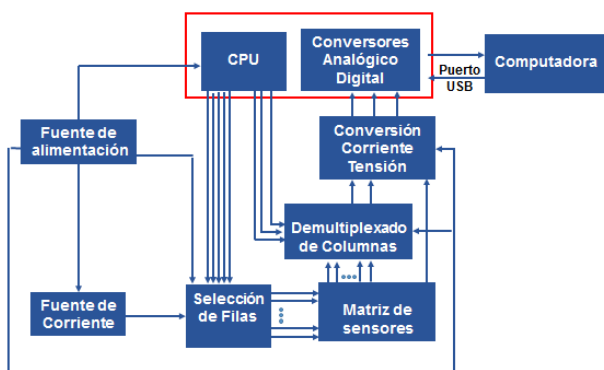


Figura 2. Diagrama en bloques

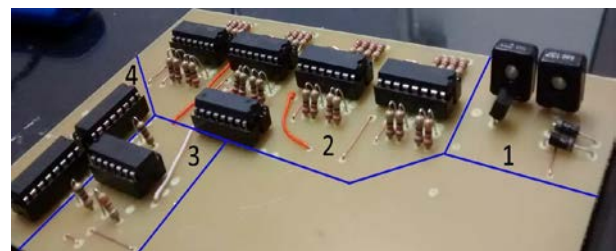


Figura 3. Diagrama en bloques prototipo  
1 Bloque "Fuente de Corriente", 2. Bloque "Selección de Filas", 3. Bloque "Conversione Corriente/Tensión" y 4. Bloque "De-Multiplexado de Convertidores"



*Prototipo final:* En la Figura 4 se muestra el prototipo para relevamiento de la huella plantar en tiempo real. Se observa la placa con los sensores (Placa sensora), que irá fijada sobre los parantes que tienen como base la placa de control (Placa controladora). Este dispositivo se colocará sobre la senda o pasarela del Laboratorio de marcha.

En este prototipo se estableció un muestreo y una reconstrucción en tiempo real a una tasa de 20 cuadros/s, que en comparación con un dispositivo comercial actual (100 cuadros/s) permite considerar que se está en un 20% de similitud.

Se consiguió generar una interfaz amigable, de fácil uso y muy bajo costo.

Se dispuso una placa de 20cm x 30cm con 512 sensores de presión redondos dispuestos en forma de panel de abeja, consiguiendo que un 91% de la superficie total sea sensible a la pisada. Se logró una densidad de 0.92 sensor/cm<sup>2</sup> que en comparación con dispositivo comercial y actual (1.64 sensor/cm<sup>2</sup>), alcanzando una semejanza por encima del 50%.

La implementación se realizó con componentes de alta disponibilidad en el mercado y en la región, lo que permite pensar en un mantenimiento de bajo costo a largo plazo.



Figura 4. Placa sensora, Prototipo final del Pedígrafo digital e Interfaz gráfica.

Las líneas de acción futuras respecto de este prototipo consisten en aumentar la densidad de sensores con el objetivo de aumentar la resolución en pantalla, introducir una comunicación inalámbrica entre el pedígrafo y la computadora para no estar limitado a las distancias máximas que establece el protocolo USB, lograr una aplicación independiente de la plataforma desarrollada en MATLAB, optimizar la aplicación de software para mostrar la reconstrucción de las huellas plantares con “píxeles redondos” en lugar de cuadrados, con la meta de añadir aún más realismo al resultado en pantalla.

Y por último, mejorar la interfaz con el usuario añadiendo funciones para establecer y operar una base de datos de pacientes.

**Digitalización de la marcha:** Se encuentra en etapa de desarrollo un sistema que capture los puntos reflectantes (ver Figura 5) colocados sobre el paciente a tratar y los digitalice para obtener un registro de la marcha sobre una pasarela. Se decidió trabajar con marcadores pasivos y cámaras infrarrojas IP con iluminación LED. Se eligió la cámara DS-2CD2632 de 3 MP de HIKVISION (Figura 6). Se utilizarán 3 cámaras iguales en el primer prototipo. Al ser una solución escalable y modular, no habrá inconvenientes futuros para incrementar el número de cámaras y prestaciones.





Figura 5. Marcadores reflectantes



Figura 6. Cámara infrarroja DS-2CD2632 de 3 MP de HIKVISION

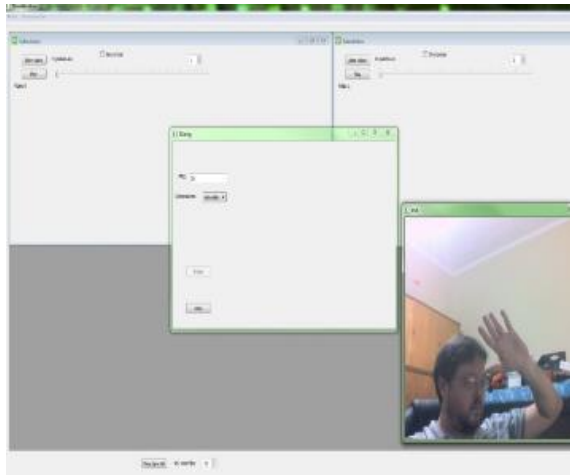


Figura 7. El Ing. Vera desarrollando software para el sistema de digitalización de la marcha.



Figura 8. Prueba de cámara (Análisis y caracterización de interfaz de comunicación de datos y software de procesamiento de imágenes para diagnóstico).

Para el primer prototipo se utilizó lenguaje C++ utilizando el framework QT 5. Esta elección permite alcanzar la máxima performance en cuanto a aprovechamiento de recursos de una PC con sistema operativo Linux, distribución Debian. Todo el sistema que se está implementando se basa en la utilización de software OpenSource, para evitar el pago de licencias y cumplir con los requisitos de bajo costo para el desarrollo del Laboratorio de marcha.

Se pretende diseñar en el espacio de trabajo en APRILP una pasarela sobre piso modular, con al menos 3 (tres) cámaras IP (escalables a 7 cámaras) que capturen el movimiento y guarden las muestras en un Servidor de datos que luego serán analizados en las estaciones de trabajo.

Actualmente se está trabajando en el análisis y caracterización de interfaz de comunicación de datos y software de procesamiento de imágenes para diagnóstico (Ver figuras 7 y 8). Se están llevando a cabo pruebas para posicionamiento óptimo de las cámaras para la adquisición de imágenes del paciente.

**Adecuación edilicia del espacio físico:** Se trabaja con profesionales de la Arquitectura para asesoramiento en la adecuación edilicia del espacio físico. Se deben decidir especificaciones para la pintura de paredes, tipo de cierre de ventanas, iluminación de la zona de trabajo, localización del servidor, y en particular el tipo de piso debajo del cual se instalará en pedígrafo digital. Se está estudiando la posibilidad de instalar tapetes anti fatiga para pisos secos que, a su vez, sean pisos modulares, acoplables, lavables y ventilados.

## CONCLUSIONES

Con el fin de proporcionar una herramienta de diagnóstico y tratamiento para pacientes con dificultades neurolocomotoras a instalar en APRILP La Plata, de modo de prestar atención gratuita a quien sea derivado para ello, se ha logrado la colaboración de tres unidades de la Facultad de Ingeniería de la UNLP. Las mismas, a través del trabajo conjunto y multidisciplinar, han desarrollado e implementado gran parte de la instrumentación solicitada. Estas Unidades de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia de la FIUNLP son UNITEC, a cargo de la coordinación general del proyecto, CeTAD, especializada en temas de hardware electrónico de alto nivel y FEP, encargada de obtener el financiamiento necesario.

El desarrollo de este equipamiento constituye un hecho altamente relevante puesto que en nuestro país sólo existe un Laboratorio de Marcha con fines diagnósticos y terapéuticos, que se encuentra bajo el ámbito de FLENI (Fundación para la Lucha contra las Enfermedades Neurológicas de la Infancia) en la localidad de Escobar.

El valor comercial de uno de estos equipos supera los 150.000 euros, por lo que implementar un Laboratorio de Marcha de Bajo costo constituye un proyecto relevante para el acceso de todos los pacientes que lo soliciten.

El proyecto se ha basado en una filosofía de desarrollo de tipo modular, escalable y replicable, con el fin de ir incrementando prestaciones a medida que se obtengan los recursos para su financiamiento. Contará con un proceso automatizado en la toma de datos y además tendrá la posibilidad de llevar un registro de estos datos.

Se ha trabajado con especialistas en fisiología y rehabilitación neurolocomotora para implementar el Laboratorio de Marcha según sus necesidades específicas. De este modo se les permitirá entender las alteraciones dinámicas de la marcha y diferenciar las causales primarias de las alteraciones secundarias y mecanismos compensatorios; definir el perfil de marcha en diferentes patologías; ayudar en la planificación de los tratamientos con mejor optimización de los recursos; aportar información para tomar decisiones con objetivos más realistas y aclarar expectativas sobre los tratamientos; les facilitará la toma de decisiones quirúrgicas con criterio multinivel, reduciendo el número de veces que el paciente debe ser intervenido, sometido a anestesia y a periodos de rehabilitación; medir los resultados de tratamientos conservadores y quirúrgicos con estimadores más objetivos y dinámicos; hablar un lenguaje común que facilita el intercambio de experiencias entre diferentes centros. Y, por último, utilizar una herramienta ampliamente reconocida para docencia e investigación.

Por último se ha trabajado en el desarrollo de competencias y compromiso social en los alumnos que participan en el proyecto: cognitivas y técnicas, sociales, éticas y afectivo-emocionales.

## BIBLIOGRAFÍA.

- [1] CRESPO, M. Desarrollo de herramientas de análisis y modelización en el laboratorio de marcha y estudio de movimientos de FLENI. *XI Jornadas Internacionales de Ingeniería Clínica y Tecnología Médica*. 2006.
- [2] CRESPO, M. Laboratorio de marcha y análisis de movimiento. Principios básicos y aplicaciones clínicas. *Arch. Neurol. Neuroc. Neuropsiquiatr.* 2009, 18, (2), 49-55
- [3] HARO D, M. *Laboratorio de análisis de marcha y movimiento* Rev. Med. Clin. Condes - 2014; 25(2) 237-247
- [4] MARTÍNEZ CARRILLO, F.; GÓMEZ JARAMILLO, F.; ROMERO CASTRO, E. Desarrollo de un laboratorio de marcha con integración sincrónica mediante una arquitectura en módulos. *Acta biol.Colomb.*, Vol. 15 N° 3, 2010 235 – 250.
- [5] <http://www.stanfordchildrens.org/en/service/motion-gait-analysis-laboratory/gait>. Acceso junio 2016.
- [6] COSENTINO R. *Miembros inferiores*. El Ateneo, Buenos Aires. 1992
- [7] BARRIENTOS, M. *Desarrollo de Instrumentación Electrónica para Relevamiento de Huellas Plantares en Tiempo Real*. Trabajo Final de Carrera Ingeniería Electrónica. FIUNLP. 2015.

## APLICACIONES INFORMATICAS PARA NIÑOS CON DISCAPACIDAD COGNITIVA Y/O MOTRIZ

Ferreyra, José.A.<sup>1,2</sup>; Ferrari, Flavio A.<sup>1</sup>;Cordero, María C.<sup>1</sup>;Terminiello, L.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UIDET UNITEC, Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 48 y 116, La Plata, Argentina, [corderomc@gmail.com](mailto:corderomc@gmail.com)

<sup>2</sup> LIFIA, Facultad de Informática.

### INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos de la UIDET UNITEC (Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia para la Calidad de la Educación en Ingeniería con orientación al uso de TIC), es abordar cuestiones sobre la aplicación de la electrónica e informática en el desarrollo de productos que ayuden a la mejora de la calidad de vida de las personas de la comunidad circundante que presentan alguna discapacidad que les impide su inclusión plena de la vida en sociedad. Los destinatarios de este proyecto, en primera instancia, son los alumnos con necesidades educativas especiales (NEE) de establecimientos de la zona, con características tales como: retardo mental, retrasos madurativos, ciegos y disminuidos visuales, sordos e hipoacúsicos, discapacitados motores (ej., parálisis cerebral, cuadripléjicos, etc.), con trastornos emocionales severos (Trastorno generalizado del Desarrollo - Trastorno del Espectro Autista), alteraciones en el desarrollo del lenguaje, diversos síndromes, etc. Las necesidades de estos alumnos son relevadas a través de acuerdos realizados con Escuelas de Educación Especial. Y son llevadas a cabo a través de proyectos de extensión universitaria en los que los dispositivos y software desarrollado es entregado a estos establecimientos y a los docentes dedicados a la Educación Especial que lo soliciten sin costo alguno.

Según proclamó en 1959 la Asamblea General de las Naciones Unidas, jugar es un derecho de la infancia y los adultos hemos de velar por su cumplimiento en todos y cada uno de los niños, aunque en algunas situaciones se encuentren serias dificultades para el desarrollo de esta actividad. Evidentemente, tanto los niños con discapacidad como los que no cuentan con ella tienen derecho al juego y al acceso a los juguetes, pero lo cierto es que los primeros encuentran serias dificultades para poder usar muchos de los juegos y juguetes del mercado. El *juego adaptado* puede considerarse como la preparación para el uso de ayudas técnicas. Las *ayudas técnicas*, o *tecnologías de apoyo*, o *rampas tecnológicas* son los productos fabricados específicamente o disponibles en el mercado, cuya función es la de permitir o facilitar la realización de determinadas acciones, de tal manera que sin su uso, estas tareas serían imposibles o muy difíciles de realizar para un individuo en una situación determinada.

El contexto o la carencia de recursos, así como limitaciones surgidas a partir de algunos tipos de discapacidad o algunas exigencias debidas a enfermedades del propio niño, pueden resultar causales de dificultades en el desarrollo de una actividad lúdica normal.

Cuando un niño presenta dificultades para jugar se debe intentar la adaptación de los mismos para que logre la habilidad de hacerlo puesto que la falta de juego en la infancia genera un desarrollo incompleto en la personalidad del niño, que puede manifestarse de diferentes formas de acuerdo al grado de privación.

Investigar y trabajar la relación juego-discapacidad es un deber de la sociedad para que todos sus miembros tengan las mismas posibilidades respecto del otro. Los niños con discapacidad también necesitan jugar y tener acceso a los distintos tipos y recursos del juego. Juguetes accesibles son parte de una demanda creciente de padres, educadores y expertos en discapacidad. Existe una necesidad real de elementos de juego accesibles para niños con

discapacidad que les permitan disfrutar de momentos de ocio, compartiendo tiempo y juguetes con otros niños con o sin discapacidad.

En lugares como Argentina la accesibilidad al material lúdico comercial adaptado a la discapacidad es reducida y en algunos casos, muy costosa. Y el uso de juguetes sin adaptaciones tal como se comercializa, se torna, a veces, imposible para estos niños, a pesar de que sencillas modificaciones permitirían el aprovechamiento del juguete.

La diversidad de la discapacidad (motora, intelectual, sensorial y sus grados de afectación) hacen que sea dificultosa la especificación de estos juguetes adaptados, pero, no obstante, se puede ofrecer una serie de recomendaciones generales para la selección y adaptación de juguetes para niños y niñas con discapacidad:

- En lo posible tratar que el diseño de los juguetes sea "diseño para todos", o con sencillas adaptaciones, de forma que los niños con y sin discapacidad puedan utilizar los mismos juegos en similares condiciones.
- Es importante elegir juguetes versátiles que permitan varias formas de interacción y a los que se les puedan cambiar las reglas. De este modo será más fácil adaptar la propuesta lúdica del juguete a las circunstancias de cada caso.
- Los materiales de juego que se utilicen deben ser adecuados a la edad.
- Deben responder a normas de seguridad y Buenas Prácticas de Manufactura para la fabricación de los juguetes y habrá que asegurar que las adaptaciones que se realicen en los mismos no introduzcan peligros en el juguete y riesgo para los usuarios.

En general, se puede decir que actualmente los juguetes son poco accesibles para personas con discapacidad. Se estima que, en el mundo, sólo el 5% de los juguetes están fabricados bajo las pautas de un diseño universal (para todos) adecuado para niños/as con discapacidad (directamente o con adaptaciones muy sencillas). Se observa también que la accesibilidad global de los juguetes va disminuyendo conforme aumenta la edad a la que se dirigen.

## PARTE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Entre los juegos educativos, los juegos de encastre estimulan la concentración y la memoria pues exigen que el niño preste particular atención a la ficha o forma y que sean capaces de analizarla para buscar otras piezas que tengan similitudes con esa forma, color, etc. Entrenan y mejoran su capacidad de observación, análisis, concentración y atención.

El encastre correcto de las piezas exige lógica y paciencia. Es un juego que estimula la observación, su inteligencia espacial y a mantener despierto el interés de llegar al final. Permite el desarrollo y ejercicio de *funciones cognitivas* tales como la observación, atención y clasificación, necesarios para *identificar y representar objetos* potenciando el desarrollo de estructuras mentales de conceptos que a su vez estimulan el *lenguaje* del niño. Contribuye al desarrollo de la *inteligencia sensorio-motriz*, por la que el niño conoce y se apropia del mundo que lo rodea a través del uso de sus sentidos, en este caso de la manipulación de objetos. Y promueve el desarrollo de la *motricidad fina* a través del ejercicio de la presión en pinza necesaria para tomar los objetos. E incorpora la noción de *forma*.

Los niños con discapacidad motora o dificultades de movimiento son de los menos considerados por el mercado de los juguetes. El desafío de los padres será entonces adaptar los juguetes, ya sea electrónicos o de encastre, para que puedan aprovecharlos y comenzar a estimular sus habilidades motrices, que aunque mínimas, serán de gran ayuda para su vida adulta. Por eso es importante que los niños puedan tener fácil acceso a todas sus posibilidades o funciones lúdicas y que no exijan mucha rapidez de movimientos o que los obliguen a efectuar movimientos simultáneos. Estos juguetes deben ser estables, o estabilizarse con materiales antideslizantes, como también engrosar las piezas, agarraderas y manijas e incorporar elementos en relieve que estimulen el contacto.



En el caso de los niños con discapacidad mental, probablemente los juguetes no requieran de adaptaciones, pero sí deben ser simples y atractivos, debido a que las personas con discapacidad intelectual reciben, procesan y organizan la información con mayor dificultad y lentitud. El reto aquí es motivarlos con juguetes y juegos que presenten pequeños desafíos que puedan conquistar y sentirse estimulados, porque la percepción de los estímulos sensoriales favorece su desarrollo cerebral y mejora sus capacidades funcionales, incluso llegando a establecer modificaciones trascendentes que promuevan el aprendizaje.

### Hardware del Juego de encastre *Las formas*

El juego de encastre denominado *Las formas* se desarrolló a solicitud de docentes de Educación Especial de la Escuela N° 535 de la ciudad de La Plata, estando destinado a niños que deben entrenar la motricidad fina, atención, memoria y concentración. A este establecimiento concurren niños de 0 a 26 años, con discapacidad cognitiva, retrasos madurativos, síndrome de Down, patologías complejas, etc. y tiene una matrícula de aproximadamente 200 alumnos.

Se construyó un primer prototipo, tal como se muestra en la Figura 1, de material acrílico con un sistema de leds que encendía al ser colocada correctamente la pieza elegida en su lugar de encastre. Las formas elegidas fueron: círculo, cuadrado, triángulo y rombo.



Figura 1. Prototipo de Juego de Encastre, Conexiones y prueba de LEDs.

Actualmente se está mejorando este prototipo, junto con profesionales y alumnos de las carreras de Diseño Industrial y Diseño en comunicación visual la Facultad de Bellas Artes de la UNLP, con figuras de diferentes colores y otras que representen elementos de la vida diaria.

Por otra parte, alumnos de la Escuela Técnica Albert Thomas que realizan sus Prácticas Profesionalizantes, dirigidos por un tutor profesional de UNITEC y supervisados por alumnos de los últimos años de la Carrera de Ingeniería Electrónica, se encuentran adaptando mejoras tales como utilizar cinta de cobre para las conexiones de las piezas metálicas, evitando soldaduras y problemas de oxidación, y trabajando los circuitos de activación de leds que se encienden al apoyar la figura de encastre correcta, de modo que no se mantengan activos sino que se corte la iluminación una vez colocada la pieza correcta.

### Las formas: Software del Juego de encastre

Otra actividad de UNITEC es replicar los dispositivos de hardware en sus correspondientes aplicaciones de software, con los mismos objetivos para los que fueron desarrollados los primeros. Dentro de las aplicaciones auxiliares desarrolladas se implementó el juego didáctico *Las formas*, haciendo una analogía del set de encastre realizado en acrílico por UNITEC, utilizando las mismas cuatro formas geométricas (círculo, triángulo, cuadrado y rombo) que se pueden insertar en su correspondiente lugar dentro del tablero.

Debido a la versatilidad que ofrecen los desarrollos informáticos, es posible hacer una representación de las formas geométricas de manera abstracta y figurativa de acuerdo a las

necesidades, es decir, por medio de elementos y objetos cotidianos que conserven la forma geométrica (moneda, porción de pizza, dado, etc.).

Asociado al software principal, *Las Formas* presenta otras actividades relacionadas, tales como: Juego de “Memoria” y “Dibujando con las Formas”, las cuales permiten reforzar conceptos en el área cognitiva.

La funcionalidad agregada que enriquece el sistema, hace que “*Las Formas*” sea un software más versátil para un grupo importante de niños con discapacidad motriz y/o cognitiva. Durante la etapa de desarrollo de la versión del primer prototipo, para la codificación de la aplicación auxiliar “Las formas” se utilizó el motor de scripting Lua 5.1. Lua es un lenguaje de extensión imperativo<sup>1</sup>, estructurado<sup>2</sup> y bastante ligero que fue diseñado como un lenguaje interpretado con una semántica extensible, y lo suficientemente compacto para usarse en diferentes plataformas. Aparte de la potencialidad y funcionalidad que presenta, Lua permite tener acceso a una gran cantidad de código libre. El entorno de programación sobre el que se utilizó Lua 5.1, fue AutoPlay Media Studio, en su versión 8.2.

En el apartado gráfico de la aplicación, se tuvo especial cuidado al momento de diseñar y elegir las imágenes a presentar en las diferentes actividades del mismo. Se trabajó de acuerdo a la opinión de profesionales de otras disciplinas a fin de que el conjunto de representaciones gráficas resultaran agradables al usuario, atrayentes y con la particularidad de presentar formas geométricas abstractas y figuras de objetos reales y cotidianos, análogas a las abstractas.

El objetivo es trabajar con la aplicación diferentes áreas y necesidades del usuario de manera específica y de acuerdo a sus requerimientos particulares.

Para el diseño, creación y modificación de imágenes ya prediseñadas, se recurrió a la aplicación de diseño Adobe Photoshop versión CS2, desarrollado por Adobe Systems®.

Todas las imágenes de “*Las Formas*” se almacenaron en formato PNG (siglas en inglés de Gráficos de Red Portátiles), permitiendo trabajar dicho elementos visuales más fácilmente, y gracias a la utilización de capas transparentes lograr efectos visuales más acabados y naturales.

Una vez concluido el desarrollo el prototipo de la aplicación, en su versión para PC, y de acuerdo a las especificaciones y recomendaciones de profesionales involucrados en el proyecto, se procedió a entregar el sistema a Fausto Celave, joven diagnosticado con TEA (Trastorno del Espectro Autista) que habitualmente colabora realizando las pruebas finales del software desarrollado para su posible mejora y hallazgo de posibles inconsistencias en la funcionalidad del mismo. Dicha evaluación, y la posterior eliminación de *bugs* del código y mejoras en la funcionalidad de interface de usuario, se llevó a cabo a fines de 2015.

Dentro de las recomendaciones de Fausto (junto con su acompañante terapéutico Ezequiel) se destacaba el interés en que la aplicación “*Las Formas*”, pudiera tener una versión en Android para ser utilizada desde celulares y tablets. Su recomendación se basaba fundamentalmente en que por la naturaleza de la interfaz de usuario, y la forma de interacción del usuario con los elementos geométricos representados (tomar y arrastrar, soltar los elementos interactivos), este tipo de desarrollo resultaba muy adecuado.

En la etapa actual, y ya con el sistema finalizado en versión PC, de manera robusta y totalmente funcional, e instalándose en las máquinas que se reciclan y entregan a Establecimientos de Educación Especial desde UNITEC, se ha empezado a hacer una

---

1 La programación imperativa es un paradigma de programación que describe la programación en términos del estado del programa y sentencias que cambian dicho estado. Los programas imperativos son un conjunto de instrucciones que le indican al computador cómo realizar una tarea.

2 La programación estructurada es un paradigma de programación orientado a mejorar la claridad, calidad y tiempo de desarrollo de un programa de computadora, utilizando únicamente subrutinas y tres estructuras: secuencia, selección (if y switch) e iteración (bucles for y while), considerando innecesario y contraproducente el uso de la instrucción de transferencia incondicional.



reingeniería de la aplicación, traduciendo parte del código fuente y estructurando de manera óptima el nuevo código de programación en ANDROID, a fin de lograr una aplicación especialmente diseñada y optimizada para los teléfonos con pantalla táctil y los dispositivos tablet.



Figura 2. Juego de Encastre y elección de formas similares

## CONCLUSIONES

- El juego es una actividad innata en los niños y, reconocida por los autores, como un elemento esencial en su desarrollo integral. La evolución en la actividad lúdica del niño a través del juego funcional, juego de autoafirmación, juego simbólico, juego social, etc., permite al niño estructurar su personalidad y en aquellos niños con discapacidad mejorar sus habilidades cognitivas y motrices.
- Buena parte de los juguetes del mercado podrían ser más accesibles sin incrementar su costo, incorporando el concepto de diseño universal. Sin embargo, es primordial informar sobre las premisas de este tipo de diseño para que pueda ser accesible a todos aquellos que lo necesiten.
- A partir del juego como el desarrollado en UNITEC se propone evaluar el impacto de la aplicación de los dispositivos y software en las personas con diferentes discapacidades con el objetivo de mejorar su calidad, disponibilidad y usabilidad. Para ello se ha trabajado en el estudio y mejora de dispositivos adaptados y tecnologías de ayuda para mejorar la calidad de vida e inclusión de las personas con discapacidad y soporte de la enseñanza-aprendizaje para NEE. Este trabajo en particular, ha estado directamente orientado a satisfacer una demanda de desarrollo tecnológico e instrumentación de bajo costo para NEE generadas a partir de requerimientos específicos de la comunidad educativa.

- El abordaje específico de los estímulos o triggers que genera su utilización escapan a las incumbencias de los profesionales que desarrollan los dispositivos, quedando a cargo de los especialistas en temas de Educación Especial y de las neurociencias, que solicitan su implementación.
- La tarea de investigación y desarrollo se efectuó incrementando los vínculos con organizaciones que atienden las necesidades, terapias y educación de personas con discapacidad de todo tipo, especialmente las cognitivas y neurolocomotoras que constituyen el mayor porcentaje de las discapacidades de la Argentina, de modo de mantener una actualización permanente.
- Estos vínculos han permitido definir necesidades específicas que es necesario atender, desarrollando equipamiento técnico de ayuda, con la consiguiente contribución al desarrollo tecnológico.
- La contribución al avance del conocimiento en los temas del proyecto es muy significativa, en particular la posibilidad de concretar patentes, títulos de propiedad intelectual y desarrollos de *hardware* y *software libre* protegidos a través de licencias del tipo “Creative Commons”. Por ello muchos de los desarrollos de la UIDET UNITEC pueden ser utilizados sin necesidad de solicitar permisos explícitos.
- La concreción del Proyecto en que se inscribe este trabajo específico ha contribuido principalmente a la formación de recursos humanos: capacitación de profesionales, colaboradores y estudiantes en esta temática que aún tiene tan poco desarrollo en la Argentina. Para completar el desarrollo del Proyecto se procederá a evaluar sus resultados en pruebas piloto sobre la población infantil para la cual fue realizada que son, en definitiva, quienes validan los dispositivos finales.
- Este trabajo también ha permitido fomentar la interacción de diferentes actores, profesionales de la Ingeniería e Informática, guiando alumnos universitarios junto con la participación de alumnos de Escuelas Técnicas logrando un equipo de trabajo eficiente para resolver un problema específico, aplicando criterios de aprendizaje por proyectos y desarrollo de competencias.
- Entre los alumnos participantes se contó con la eficaz colaboración de Fausto Celave, diagnosticado con un Trastorno del Espectro Autista desde temprana edad, y que fue el encargado de realizar las pruebas de funcionamiento del software desarrollado.
- Este trabajo ha sido financiado fundamentalmente a través de Proyectos de Extensión de la UNLP, afirmando la relación entre la Universidad y la sociedad, permitiendo la entrega a título gratuito de los dispositivos electrónicos e informáticos desarrollados.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] FERRARI, F.A. et al. (2015). Rampas Tecnológicas para mejora de la accesibilidad e inclusión. *Anales de las III Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería. ITE 2015*. La Plata, Argentina. ISBN 978-950-34-1189-6.
- [2] *Vigotsky y su teoría constructivista del juego*. <http://biblioteca.ucm.es>. Acceso junio 2016
- [3] *Piaget y el valor del juego en su Teoría Estructuralista*. <http://biblioteca.ucm.es/revcul/e-learning-innova/6/art431.php> Acceso junio 2016
- [4] MONTESSORI, M. (1949) *Educar para un nuevo mundo*. Editorial Lozada. Buenos Aires.
- [5] MONGE A., M., MENESES M., M., (2001) *El juego en los niños: enfoque teórico*. Educación [en línea], 25 (septiembre): [Fecha de consulta: 20 de junio de 2016] Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44025210>. ISSN 0379-7082

- [6] CARMONA LÓPEZ, M. (2004) *Psicomotricidad y juego en la atención temprana de niños con discapacidad*. Tesis. Centro de Valoración y Orientación Delegación de Asuntos Sociales de Granada Junta de Andalucía.
- [7] HAZBUN GUERRA, L. (2008) “*Juguete para personas con capacidades diferentes*”. Proyecto III. Universidad Rafael Landívar Facultad de Arquitectura y Diseño Departamento de Diseño Industrial. Guatemala. <http://biblio3.url.edu.gt/CDTK/Hazbun-Lily.pdf>. Acceso 20/06/2016.
- [8] MARTÍN-CARO, L. *El juego adaptado como preparación en el uso de Ayudas Técnicas*. [http://www.asociacionaccent.com/informa/12\\_Tecnicas\\_DISCAPACIDAD/TD01\\_Discapacidad\\_juegos\\_adaptados\\_motoricos.pdf](http://www.asociacionaccent.com/informa/12_Tecnicas_DISCAPACIDAD/TD01_Discapacidad_juegos_adaptados_motoricos.pdf). Acceso 20/06/2016

## PRÁCTICAS PROFESIONALES SUPERVISADAS: FORMACIÓN PROFESIONAL EN EL MARCO DE PROYECTOS DE EXTENSIÓN UNIVERSITARIA

Flavio A Ferrari, José I. Gialonardo, Mónica González, María Cristina Cordero, UIDET UNITEC Enrique D. Sanmarco, UIDET IAME  
Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 48 y 116, La Plata, Argentina. [dispos@ing.unlp.edu.ar](mailto:dispos@ing.unlp.edu.ar)

### INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las Prácticas Profesionales Supervisadas (PPS) tiene como objetivo acercar a los alumnos al ejercicio profesional en su real dimensión, permitiendo que los conocimientos aprendidos y aprehendidos en el transcurso de la carrera encuentren un correlato real con las prácticas en el campo laboral. Para ello los alumnos deben cumplimentar un mínimo de 200 horas para completar las actividades correspondientes a estas prácticas.

En la Facultad de Ingeniería de la UNLP la PPS se reglamenta a través de la Resolución 082/03 “Reglamento General de Prácticas Profesionales” según la cual durante el desarrollo de la PPS las tareas que corresponderán cumplir los estudiantes de las distintas carreras de Ingeniería se debieran desempeñar “en los sectores productivos y/o de servicios, o bien en proyectos concretos desarrollados por la Institución para estos sectores o en cooperación con ellos” [1].

Sin embargo, no siempre los sectores productivos están dispuestos a aceptar en sus filas estudiantes noveles para cumplir el requisito de culminar su formación como ingenieros por medio de la PPS. Es por ello que en la Facultad de Ingeniería la Resolución 569/14 permite incluir la posibilidad de la realización de la PPS a través de la ejecución en Centros, Laboratorios o Institutos de la UNLP, y últimamente, la posibilidad de realización de la PPS en Proyectos de Extensión acreditados [2].

Esta alternativa permite promover la incorporación de la práctica de Extensión en el currículum universitario contribuyendo a la formación de graduados cumpliendo premisas de la Responsabilidad Social Universitaria. Las actividades que permiten identificar los problemas y demandas de la sociedad y su medio, coordinar las correspondientes acciones de transferencia, reorientar y recrear actividades de docencia e investigación a partir de la interacción con ese contexto, constituyen la Extensión Universitaria. Por ello, la Universidad Nacional de La Plata en su Estatuto fundacional y en su posterior modificación [3] incluye a la Extensión Universitaria como una de las funciones principales, definiéndola como la presencia e interacción académica mediante la cual, la Universidad aporta a la sociedad en forma crítica y creadora, los resultados y logros de su investigación y docencia, y al conocer la realidad nacional enriquece y redimensiona toda su actividad académica conjunta.

La Extensión Universitaria no es una actividad unidireccional sino que debe producirse un "diálogo" permanente entre el que da (Universidad) y el que recibe (Sociedad y Medio), lo que significa que el sujeto que da, el que extiende, se enriquece en forma permanente. Bajo estos lineamientos desarrolla sus actividades la UIDET UNITEC. En particular, UNITEC LATE: Producción de bienes y servicios para la inclusión educativa y desarrollo social en el Laboratorio de Asistencia Técnica a Establecimientos de Educación Especial y EDETEC: Espacio de Desarrollo de Rampas Tecnológicas para mejora de la accesibilidad e inclusión, son dos proyectos acreditados y subsidiados alternativamente y por diferentes períodos desde hace años, que tienen gran impacto dentro de la comunidad relacionada con la mejora de la calidad de vida y educación de personas con discapacidad. Se presentan las PPS que fueron desarrolladas por cuatro alumnos de la Carrera de Ingeniería en Computación, una alumna de

la Carrera de Ingeniería Industrial y un alumno de la Carrera de Ingeniería Electrónica. Las actividades realizadas se inscribieron en alguno de los siguientes proyectos de extensión:

- UNITEC LATE: Producción de bienes y servicios para la inclusión educativa y desarrollo social en el Laboratorio de Asistencia Técnica a Establecimientos de Educación Especial  
UNITEC LATE es un proyecto multidisciplinario para la producción de dispositivos tecnológicos para mejorar la calidad de vida y las necesidades especiales educativas (NEE) de personas con discapacidad. Se trabaja en el reacondicionamiento y adaptación de PCs, obsoletas o en desuso, y periféricos para ser reutilizados como elementos didácticos a requerimiento de establecimientos de educación especial, para resolver NEE que permitan la inclusión de niños y jóvenes con diferentes discapacidades para el desarrollo social de este sector de la comunidad. Se adapta, produce y desarrolla hardware y software libre y/o comercial de forma de proporcionar un nuevo entorno de enseñanza-aprendizaje que facilite la comunicación, el acceso y procesamiento de la información, el desarrollo cognitivo y la autonomía, brindando también la posibilidad de realizar actividades laborales. UNITEC LATE ha sido acreditado sucesivamente desde 2008. Las actividades de este Proyecto son consideradas área de vacancia ya que no existe aún otra institución nacional, provincial o municipal que proporcione estos dispositivos con los requerimientos que necesita y requiere la comunidad educativa. Se han firmado alrededor de 50 acuerdos de colaboración con las instituciones beneficiarias.

- EDETEC, Espacio de Desarrollo de Rampas Tecnológicas para mejora de la accesibilidad e inclusión

Surgió en el año 2013 de la inquietud de docentes de Educación Especial de la ciudad de La Plata y zonas aledañas que manifestaron a UNITEC la necesidad de contar con elementos de ayuda técnica para NEE de sus alumnos con discapacidad, de modo de obtener dispositivos que facilitaran la comunicación con los alumnos con mayor grado de discapacidad en el habla y la motricidad. Actualmente se ha expandido a otras instituciones y también a particulares que solicitan adaptaciones. El uso temprano de estos dispositivos otorga mayores posibilidades de éxito para la inclusión en la comunidad de estos alumnos, mejorando su calidad de vida logrando su inclusión en el medio social. Aquí también se cubre un área de vacancia. Ninguna institución nacional, provincial o municipal proporciona estos dispositivos de bajo costo y replicables para quien lo requiera.

- LABORATORIO DE MARCHA y Análisis del Movimiento de bajo costo para estudios diagnósticos y terapéuticos con fines sociales

A solicitud de APRILP (Asociación Pro Rehabilitación Infantil La Plata) se propuso el desarrollo de un sistema de alta tecnología de bajo costo para registrar el movimiento, las fuerzas y la actividad muscular durante la marcha de un paciente en forma tridimensional y sincronizada en el tiempo. El nivel de detalle y la calidad de la información provista, facilita el reconocimiento preciso de los principales problemas funcionales y su relación con la causa que los genera, información que es evaluada consensuando la interpretación de la disfunción. La adecuada interpretación diagnóstica sustenta la propuesta de tratamiento más efectiva para el paciente. La selección del tratamiento puede involucrar la planificación de programas de rehabilitación kinésica funcional, la planificación quirúrgica de alta precisión orientada al menor número de tiempos operatorios y de internaciones posibles, el diseño de programas de rehabilitación postoperatoria de gran efectividad, la decisión de un tratamiento farmacológico o la evaluación de equipamiento ortésico y de asistencia.

## **PARTE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **PPS para Ingeniería Industrial**

El Plan de Trabajo presentado ante el Director de Carrera de Ingeniería Industrial de la FIUNLP para su factibilidad y evaluación se resume en los siguientes puntos:

- Análisis, revisión, verificación y mantenimiento del sistema de gestión de calidad del Laboratorio de Asistencia Técnica a establecimientos de Educación Especial (UNITEC LATE). Revisión de procedimientos y protocolos.
- Análisis de los distintos proyectos que se desarrollan en la organización
- Elaboración de un informe con los resultados obtenidos en cada uno de los proyectos. Incluir memorias técnicas de los desarrollos del proyecto EDETEC, circuitos asociados, hojas de datos, código fuente de software, etc.
- Informar no conformidades detectadas en proyectos y desarrollos de ayudas técnicas.
- Control de la documentación referida a los distintos proyectos.
- Establecer plazos para el control de la documentación.
- Desarrollar informes de avance.
- Asistir a reuniones con los autores y supervisores de cada proyecto, obtener datos, discutir protocolos, etc.

En la redacción del Plan de Trabajo se trabajó en conjunto con el alumno para determinar si las actividades se correspondían con las incumbencias profesionales de la carrera. La alumna comenzó la realización efectiva de la PPS habiendo aprobado un total de 40 materias de la carrera de Ingeniería Industrial, restándole sólo el Proyecto Final de carrera.

Al finalizar la PPS, la alumna entregó un informe de las actividades llevadas a cabo, junto con la evaluación del responsable de UNITEC que supervisó su PPS, al Director de Carrera, habiendo aprobado la misma en marzo de 2016, superando las 200 hs. de trabajo.

### **PPS para Ingeniería en Computación**

Se llevaron a cabo 4 PPS de la carrera de Ingeniería en Computación dentro del Proyecto de Extensión EDETEC. Para su realización se verificaron algunas incumbencias a tener en cuenta: Realizar tareas de Investigación y Desarrollo en temas que vinculen la Electrónica con la Informática. Entender, planificar, desarrollar, dirigir y/o controlar la instalación y mantenimiento de sistemas electrónicos de procesamiento de datos/señales que requieran control por software. Supervisar la implantación de sistemas que integren hardware y software así como organizar y capacitar al personal afectado por dichos sistemas.

El Plan de Trabajo presentado ante el Director de Carrera de Ingeniería en Computación de la FIUNLP para su factibilidad y evaluación se resume en los siguientes puntos:

#### **Plan Alumno 1 y 3**

Colaborar en el desarrollo de un Comunicador digital sobre plataforma Android (Alumno 1) y sobre plataforma JAVA (Alumno 3), basado en un dispositivo previo desarrollado en Labview, destinado al uso de personas con discapacidades severas imposibilitadas del habla. El alumno estará encargado específicamente del software de síntesis de voz. Se realizará en el marco del Proyecto de Extensión EDETEC (Espacio de desarrollo de rampas tecnológicas, para mejora de la accesibilidad en inclusión) de la UIDET UNITEC.

Las tareas previstas serán las siguientes:

- Desarrollo del software para el sintetizador de voz y voz en teclas de respuesta rápida basado en el intercomunicador realizado sobre la plataforma Labview



- Búsqueda bibliográfica y comparación con equipos comerciales actuales.
- Analizar mejoras que puedan desarrollarse sobre el software a desarrollar en Android.
- Desarrollar la aplicación en Android con la característica de que sea utilizable en múltiples dispositivos.
- Realizar informe documentando el trabajo realizado.
- Concurrir a los Seminarios de Seguridad en el Trabajo e Introducción a los Sistemas de Calidad.

#### **Plan Alumno 2 y 4**

Colaborar en el desarrollo de un Comunicador digital sobre plataforma Android (Alumno 2) y sobre plataforma JAVA (Alumno 4), basado en un dispositivo desarrollado en Labview, destinado al uso de personas con discapacidades severas imposibilitadas del habla. El alumno estará encargado específicamente del software de la interfaz gráfica. Se realizará en el marco del Proyecto de Extensión EDETEC (Espacio de desarrollo de rampas tecnológicas, para mejora de la accesibilidad en inclusión) de la UIDET UNITEC.

Las tareas previstas serán las siguientes:

- Analizar la funcionalidad del software Intercom-v1.3.
- Analizar la interfaz del software Intercom-v1.3.
- Determinar las funcionalidades de Intercom-v1.3 que pueden desarrollarse en la plataforma Android.
- Analizar mejoras que puedan desarrollarse sobre el software a desarrollar en Android.
- Desarrollar la aplicación en Android con la característica de que sea utilizable en múltiples dispositivos.
- Realizar informe documentando el trabajo realizado.
- Concurrir a los Seminarios de Seguridad en el Trabajo e Introducción a los Sistemas de Calidad.

#### **PPS para Ingeniería Electrónica**

Durante 2015 y por espacio de 240 horas se llevó a cabo una PPS para la Carrera de Ingeniería Electrónica. Dentro de las incumbencias de la carrera figura formar profesionales capacitados para estudiar, diseñar, construir y mantener equipos, sistemas y dispositivos electrónicos y de procesamiento de señales electromagnéticas en general. Proyectar, planificar, diseñar, estudiar la factibilidad, dirección, construcción, instalación, programación, operación, ensayo, medición, mantenimiento, reparación, transformación, puesta en funcionamiento e inspección de sistemas electrónicos y sus partes.

El Plan de Trabajo presentado ante el Director de Carrera de Ingeniería Electrónica se resume en los siguientes puntos:

- Colaborar activamente en el Desarrollo de un Pedígrafo digital, parte componente de un Laboratorio de Marcha, utilizado para relevamiento de huellas plantares en tiempo real. Las actividades se desarrollarán en la UIDET UNITEC, en el Área de Desarrollos Tecnológicos y dentro del Proyecto de Extensión Laboratorio de Marcha de bajo costo con fines asistenciales.
- Búsqueda bibliográfica sobre el tema en general, realización de un seminario en el grupo de trabajo, planeamiento estratégico de etapas del desarrollo especificado, asignación de actividades a los subgrupos de trabajo: Desarrollo pedígrafo, desarrollo Software, etc. Estudio de diferentes soluciones comerciales y ad hoc de pedígrafo existentes.
- Estudio, desarrollo y selección de configuraciones de sensores de presión.
- Estudio y ensayo de geometrías de electrodos y gomas conductoras.
- Interacción con otros grupos de trabajo de la FI. Reuniones semanales de trabajo y de

información de avances realizados. Elección de sensores, gestión de compras, evaluación de proveedores.

- Asistencia a seminarios de Seguridad en el Trabajo y de Sistema de Gestión de Calidad. Visita a FLENI, para observación y asesoramiento por parte del Sector de Bioingeniería de un Laboratorio de Marcha de altas prestaciones.
- Completar su formación en Software para diseñar circuitos impresos y criterios básicos para su fabricación. Criterios de buenas prácticas de soldado.

El alumno debió interactuar con un grupo de profesionales de la Ingeniería y Medicina debido a la aplicación elegida para desarrollar su PPS. Encontró diversas dificultades, tales como la elección de las gomas conductoras, debido a que las que más se adecuaban eran de difícil obtención por su precio y por obstáculos en la importación, tomando la decisión finalmente de utilizar un producto nacional que debió ser ensayado en el GEMA del Departamento de Aeronáutica. Debió familiarizarse con varios softwares: Proteus 7.7 – ISIS Programa diseño asistido para la simulación de circuitos, Proteus 7.7 – ARES Programa de diseño asistido para la realización de circuitos impresos y MATLAB 11ª, Programa matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio utilizado para realizar cálculos, simulaciones e interfaces con el usuario.

Debido a la complejidad del proyecto se trabajó en equipo con otros dos estudiantes avanzados de la carrera.

La Figura 1 muestra un modelo del Informe Final realizado por el Coordinador de UNITEC respecto de las competencias adquiridas por el alumno/a en la realización de su PPS. El mismo puede ser adaptado a cada carrera en particular.

<p><b>Alumno</b>                  Apellido y Nombres:                  N° de alumno:                  Carrera:</p>
<p><b><u>Evaluación – informe del tutor</u></b> (evalúe del 0 al 10 las siguientes tareas, o no aplica las siguientes tareas)</p> <p>Comprendió el funcionamiento de la organización de la entidad?                  Se adaptó a las atribuciones y responsabilidades de cada función?                  Aprendió a manejar las relaciones humanas en los diferentes niveles jerárquicos?                  Se adaptó a los métodos de trabajo utilizados?                  Desarrolló habilidades para desempeñarse en tareas multidisciplinarias?                  Asimiló las políticas de seguridad y calidad?</p> <p>Planificación                  Gestión N/A                  Identificación de problemas                  Desarrollo de soluciones                  Trabajo en equipo                  Elaboración de informes                  Supervisión N/A                  Aplicación de criterios                  Manejo de idiomas                  Respuesta a las indicaciones dispuestas por el Tutor de la Entidad                  Respeto a las normas de concurrencia, actuación y conducta                  Demostró capacidad para desarrollar sistemas/subsistemas/productos asociados con la actividad de un Ingeniero en -----?</p> <p><b><u>Evaluación conceptual, sugerencias del Tutor:</u></b></p>
<p><b>Firma Tutor de la Entidad</b></p>

Figura 1: Modelo de Informe del tutor de UNITEC

## CONCLUSIONES

En el desarrollo de PPS realizadas en los Proyectos de Extensión de UNITEC se han transitado diferentes caminos, y fruto de las actividades desarrolladas y de las opiniones de los estudiantes y docentes involucrados en ellas se puede concluir que es deseable que las instancias de progreso de las mismas sean revalorizadas por todos los actores involucrados.

Se ha tratado de fomentar el desarrollo de prácticas que se relacionen con actividades de I+D+i, permitiendo que los tutores y guías se comprometan en la tarea de revisión crítica de las producciones y en la delimitación correcta de la problemática a resolver.

La modalidad adoptada favorece el trabajo en equipo, la búsqueda de soluciones innovadoras, el desarrollo de capacidades técnicas y prácticas para construir conocimientos y habilidades profesionales. Todo ello resultado de un enfoque de trabajo y de enseñanza-aprendizaje basado en el desarrollo de competencias. El manejo de estrategias didácticas para el desarrollo de competencias conlleva un proceso de apertura a nuevas formas de relacionarse con los alumnos, guiando a los estudiantes para que ocupen un rol protagónico en los trabajos que realizan, para que dejen de lado actitudes pasivas y asuman una actitud activa y dinámica para el logro de los objetivos propuestos.

La experiencia desarrollada ha constituido una herramienta valiosa para la enseñanza universitaria, tanto para los estudiantes que han afianzado sus saberes y desempeño como futuros profesionales, como para los tutores en su papel de orientadores.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] [http://www.ing.unlp.edu.ar/practicas\\_profesionales](http://www.ing.unlp.edu.ar/practicas_profesionales) Acceso Junio 2016

[2] 082/03 Reglamento General de Prácticas Profesionales (modificada por Resolución 569/14). <http://www.ing.unlp.edu.ar/articulo/2016/4/21/legislacion>

[3] Universidad Nacional de La Plata. [www.unlp.edu.ar](http://www.unlp.edu.ar). Acceso Junio 2016

## LA EXTENSIÓN UNIVERSITARIA EN PROCESOS DE ARTICULACIÓN UNIVERSIDAD-ESCUELA MEDIA

Vargas Larrea, José.I.<sup>1</sup>; Fernández Busse, Marcelo; Ferrari, Flavio A.<sup>1</sup>; Cordero, María C.<sup>1</sup>;

<sup>1</sup>UIDET UNITEC, Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 48 y 116, La Plata, Argentina, [corderomc@gmail.com](mailto:corderomc@gmail.com)

### INTRODUCCIÓN

La *articulación* en todos los niveles educativos y modalidades, superando los compartimientos estancos, es uno de los temas centrales para que el sistema educativo mejore sustancialmente su calidad, en un marco de diversidad y equidad [1, 2, 3].

Dice Aguerro [1]: “La articulación es una *cuestión de gestión institucional* que requiere un debate y análisis reflexivo desde una *perspectiva profesional* de los docentes, fundamentada en saberes expertos, estrategias, compromisos y disposición positiva para concretarla, además de políticas educativas y sociales adecuadas”.

La consecuencia lógica de la articulación entre niveles es la continuidad educativa, de modo que se genera una secuencia lógica de adquisición de saberes, contenidos conceptuales, procedimientos y técnicas de estudio. Y también una continuidad en las competencias transversales, de la transición en las estrategias metodológicas; la graduación en las exigencias de trabajo y evaluación de los alumnos.

Respecto de la *articulación nivel medio y universitario* existen dificultades en la comprensión y producción de textos, dificultades en la resolución de problemas lógicos y matemáticos, falta de información sobre la oferta académica de las universidades y obstáculos relacionados con los procesos de orientación educacional y vocacional.

Se ha propuesto como alternativa para superar los problemas mencionados la generación de espacios de reflexión y encuentro de profesores del nivel medio y universitario, para elaborar un proyecto de articulación concertado: identificar los problemas de los alumnos, diseñar materiales y estrategias pedagógicas, desarrollar programas de capacitación, difundir las ofertas universitarias, de modo de atacar el problema vocacional para tratar de promover el desarrollo de aptitudes científicas y tecnológicas, por lo cual para llevar este objetivo a cabo se debe contar con los espacios y las actividades que lo permitan.

En concordancia con lo anterior, el Ministerio de Educación de la República Argentina ha promovido desde el año 2012 el Plan Estratégico de Formación de Ingenieros 2012-2016. Este asume entre sus objetivos principales aumentar la cantidad de graduados en carreras de Ingeniería. En este programa se proponen un conjunto de líneas de acción a seguir y se destaca “la generación de vocaciones tempranas”.

Acompañando estas concepciones desde la UIDET UNITEC (Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia para la Calidad de la Educación en Ingeniería con orientación en el uso de TIC) se generó un proyecto con el objetivo de despertar el interés por la ciencia y la tecnología en alumnos del último año de escuelas técnicas. Se trata de aplicar los conocimientos adquiridos a situaciones reales, solucionando problemas vinculados con algunas necesidades de la sociedad, haciendo partícipe al alumno de su propio proceso de aprendizaje y aplicándolo a casos concretos. Al mismo tiempo, el alumno cumple con las horas correspondientes a las Prácticas Profesionalizantes exigidas por la currícula para acceder al título de Técnico en Electrónica.

Las Prácticas Profesionalizantes fueron establecidas por la Ley de Educación Técnico Profesional N° 26058 y por tanto, son obligatorias para todos los alumnos que cursen la Escuela Técnica, es decir, que para obtener el título técnico, los alumnos deberán acreditar un

mínimo de 200 horas de Prácticas Profesionalizantes (PP) que podrán cumplir a través de distintos tipos de actividades que organizará cada escuela.

La Resolución 112/13 de la Dirección General de Escuelas establece las pautas generales para su realización en la Provincia y en los Anexos se presenta el modelo de acta acuerdo.

Existe un Registro único de PP que es una base de datos registral que elabora el Consejo Provincial de Educación y Trabajo (COPRET) donde quedan asentadas todas las PP que se realicen en la Provincia de Buenos Aires. El Director de la escuela técnica tiene la obligación de elevar las planillas con la información de las PP que se hagan en su institución.

Los Directores de Escuelas pueden firmar Actas Acuerdo (Anexo 2 de la Res. 112) con las empresas o instituciones para la realización de PP. Estas actas acuerdo dan marco a la vinculación de modo general, por lo tanto pueden firmarse en un principio, antes de definir el plan exacto de la práctica. Escuela y Empresa elaboran conjuntamente el Plan de Práctica Profesionalizante, que incluye todas las tareas que realizarán los alumnos en la misma. Éste debe ser aprobado por la supervisión y elevado a la Dirección de Educación Técnica de la Provincia de Buenos Aires.

Entre la UIDET UNITEC de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata y la Escuela Técnica N° 6 Albert Thomas de La Plata, se han firmado los acuerdos de colaboración correspondientes para la realización de Prácticas Profesionalizantes para la Tecnicatura en Electrónica.

Las actividades más conocidas que acreditan como PP son las pasantías, en empresas, organismos estatales o privados u ONGs. También se considerarán los proyectos productivos articulados entre la escuela y otras instituciones o entidades, proyectos productivos institucionales orientados a satisfacer demandas específicas de determinada producción de bienes o servicios, o destinados a satisfacer necesidades de la propia institución escolar, emprendimientos a cargo de los alumnos, actividades o proyectos para responder a necesidades o problemáticas de la comunidad.

Lo fundamental en todos los casos es que cualquier actividad que se elija debe cumplir con el objetivo principal de las PP: poner en práctica saberes profesionales sobre procesos productivos de bienes y servicios, relacionados con el futuro entorno de trabajo del estudiante. Es decir, deben estar relacionadas con la especialidad que el alumno estudia en la escuela y vincularlo con el tipo de trabajo que realizará cuando egrese.

Los alumnos podrán realizar todas las actividades que se hayan acordado con la escuela en el Plan de Prácticas y, por ende, que se correspondan al perfil profesional de egreso de la especialidad que cursa el alumno.

Los alumnos están cubiertos con el seguro escolar (Póliza Nro. 60.830 de la aseguradora Provincia Seguros (que incluye el itínere y todas las actividades que realice el alumno en la organización, siempre que éstas estén incorporadas en el Plan de Prácticas.

## **PARTE EXPERIMENTAL, RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **PP en UNITEC**

UNITEC puede ser considerado un laboratorio de ciencia solidaria, donde profesionales y futuros ingenieros de la UNLP decidieron disminuir la brecha hacia una sociedad más inclusiva y equitativa, desarrollando un espacio para brindar soluciones a bajo costo y de forma personalizada a personas con discapacidad.

Los prototipos desarrollados brindan soluciones efectivas para las personas con discapacidad, en especial, motrices y mentales, respondiendo a sus necesidades específicas y particulares, llevándolas a cabo en el menor tiempo posible. Con esta impronta se estableció UNITEC EDETEC, un proyecto de extensión de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata diseñado para ayudar y capacitar a través de ayudas técnicas para la discapacidad.

Estos proyectos partieron de la asistencia tecnológica para luego transformarse en un más amplio proyecto creativo, pedagógico y solidario que se sustenta en la integralidad científica, dada por la suma de la investigación, la extensión universitaria y la docencia.

El primer proyecto nació en 2008, cuando las docentes de la Escuela Especial nº 535 de La Plata solicitaron a profesionales de UNITEC la reparación de computadoras que, hasta entonces, no habían podido utilizar. Luego de su reacondicionamiento, el equipo de trabajo se dio cuenta de que había logrado algo más que un simple servicio técnico: se había realizado un trabajo solidario para la comunidad educativa y como consecuencia de ello se había logrado que una alumna con inmensas dificultades por su retraso madurativo lograra escribir su nombre por primera vez, generándose también un proyecto propio de informática en la Escuela.

A partir de esta experiencia, el grupo de alumnos y docentes de UNITEC fue generando distintos proyectos que buscan resolver problemáticas específicas de las diferentes manifestaciones de la discapacidad, a corto plazo y a bajo costo.

Así se forjaron los primeros lazos entre UNITEC y la Escuela Técnica Albert Thomas de La Plata, con la que se realizó un convenio de prácticas profesionalizantes para sus alumnos que, mientras aprenden a reparar, armar y reacondicionar PCs, tengan un primer contacto con el ámbito universitario y profesional, dando origen a UNITEC LATE Laboratorio de Asistencia Técnica a Escuelas de Educación Especial.

Pero el reacondicionamiento de computadoras fue tan solo el puntapié inicial. Una vez que las maestras observaron los resultados y se capacitaron para utilizarlas, comenzaron a demandar hardware y software más específico para acercar la tecnología a los alumnos que padecían diversas dificultades. Algunos de estos pedidos eran de fácil solución y, otros, ni siquiera se encontraban en el mercado.

De ahí que, por ejemplo, se desarrollaron diversas variantes de mouse de computadora para que personas con escasa movilidad lo pudieran manipular, o juguetes adaptados para enseñar la noción de “acción/reacción” o causa/efecto, entre otros elementos que debían cumplir con requisitos como la autoportabilidad, el bajo costo, la eficacia y, sobretodo, la urgencia, siempre teniendo en cuenta que la producción de hardware y software especializado para inclusión es, en cierta medida, incompatible con la manufactura en serie: Ante la misma discapacidad las personas se manejan de forma diferente. Las discapacidades son infinitas, y las necesidades, muy personalizadas.

### **Distribución de PP en los distintos espacios de UNITEC**

Las actividades de las PP se realizan en diferentes espacios de la UIDET UNITEC y de unidades asociadas por acuerdos entre las mismas. Los alumnos pueden realizar sus PP en uno solo de estos espacios o ir rotando por los mismos con la única condición de cumplimentar las 200 horas exigidas.

Las PP se realizan en:

1. Espacios de la UIDET UNITEC donde se desarrollan las prácticas:
  - UNITEC LATE: Laboratorio de Asistencia técnica a Establecimientos de Educación Especial
  - UNITEC LabTIC: Laboratorio de desarrollo de Hardware y Software con orientación al uso de TICs
  - UNITEC EDETEC: Espacio de Desarrollos Tecnológicos
2. UIDET CeTAD (Centro de Técnicas analógico-Digitales) por acuerdo con UNITEC

Las tareas realizadas en UNITEC LATE fueron las siguientes:

- Armado de PC: revisión y puesta a punto de computadoras donadas tanto en Hardware como en Software (reinstalación de Sistema Operativo).
- Revisión y reparación de partes de computadora: lectoras de CD, fuentes de alimentación, Memorias (prueba y clasificación), disqueteras, Discos rígidos.
- Estudio y búsqueda de drivers sobre distintas placas madres de PC (mothers)
- Armado de informes mensuales de tareas realizadas e informe final.



Cursos realizados:

- Curso de nivelación sobre reparación de PC. Duración: 10 hs en la escuela y en UNITEC.
- Capacitación en uso de programas de verificación de Hardware realizada por los supervisores (alumnos de Ingeniería de los últimos años) en el Laboratorio.

Las tareas realizadas en UNITEC EDETEC fueron las siguientes:

- Tareas de estudio, desarrollo y armado de una fresadora:  
Dispositivo pensado para la realización de circuitos impresos (PCB) de armado simple, replicable y de un costo bajo. La fresadora está compuesta por una base por la cual un cabezal se desplaza en los ejes x, y (para el desplazamiento) y z (para decir cuándo y cuando no apoyar la punta del cabezal) mediante motores paso a paso comandados por los datos que interpreta el Arduino UNO del ordenador. Se basa en cuatro pilares principales que componen el proyecto, que son, la parte mecánica (motores paso a paso), diseño y cálculo del paso de cada motor; la parte electrónica (comunicación de los motores con el Arduino uno, diseño de fuente de alimentación regulada); la parte de programación (interpretación de los datos que envía el ordenador mediante el puerto serie o USB al Arduino uno) y los cálculos necesarios que deba realizar el Arduino para comandar los motores.
- Acondicionamiento y adaptación de distintos juguetes a través de Switchs para ser utilizados por personas con discapacidad. Las tareas se realizaron tanto sobre juguetes propios de distintas escuelas especiales, como sobre otros ya existentes en el Laboratorio a modo de prototipo.
- Adaptación de 12 Mouses con conexión a Switch para ser utilizados en el curso de capacitación a maestras por acuerdo CFAP- UNITEC.
- Estudio de distintos tipo de Switch para adaptar.
- Estudio de las plataformas de trabajo de ARDUINO UNO y Software de control del mismo. Motores Paso a Paso (PaP).
- Estudio de distintos tipo de varillas roscadas.
- Estudio de hoja de datos de regulador de voltaje LM350.

Cursos realizados:

- Curso de nivelación sobre reparación de PC. Duración: 10 hs en aulas de la UNLP

Las tareas realizadas en UNITEC LABTIC fueron las siguientes:

- En este Laboratorio se instala Software (aplicaciones) para ser utilizados por personas con discapacidad conforme la patología y la edad. También se hacen desarrollos prototípicos de alguno de ellos. Se cargan en las PC que entrega UNITEC LATE, las que también se verifican en el correcto funcionamiento tanto del SO como del Software instalado.
- Se trabajó sobre el Software “Virtual MagnifyingGlass” y “NVDA” en los equipos con Windows XP donde no funcionaba, dejándolos operativos.
- Se trabajó con distintos programas como Bit essence Instalmaker, Toca La Pantalla, Clic 3, EmuClic 1.6, armando los instaladores desatendidos .msi
- Se trabajó en la mejoras de los escritorios de las PC bajo Windows 98 – XP y W. Seven.

Cursos realizados:

Curso de nivelación sobre reparación de PC. Duración: 10 hs en aulas de la UNLP

- Estudio, análisis y prueba de distintos Software y herramientas de instalación en PC.

En este espacio el alumno Fausto Celave, diagnosticado con Trastorno del Espectro Autista, colaboró para la realización de su PP y continuó haciéndolo después de obtener la Tecnicatura:

- Trabajó en la instalación de los distintos Software especiales en los equipos PC provenientes del LATE como: Clic 3, Click-N-Type, Descubrir, etc...También en el estudio del programa “Preparados-listo-Switch” para personas con dificultades en la escritura en PC. Y en la realización de tests en software desarrollado especialmente.

Tareas en todos los Laboratorios

- Desguace de Impresoras en desuso por mal funcionamiento u obsolescencia para la reutilización de partes útiles (ejes, motores PaP, electrónica, etc)
- Se procedió al armado de PC desde cero, con sus distintos componentes para su reconocimiento.

Las tareas en la UIDET CeTAD consistieron en el reacondicionamiento de dispositivos electrónicos didácticos de Cátedras, reparación de fuentes, organización de material electrónico, verificación de funcionamiento de diferentes dispositivos y entrenamiento en el manejo de instrumentación de medición: voltímetros, multímetros, osciloscopio, generadores de onda, etc.

En un todo de acuerdo con los conceptos de enseñanza por competencias se organiza el proyecto de articulación realizado en la UIDET UNITEC. En el mismo se trata que el alumno secundario adquiera conocimientos, se apropie de los mismos en la realización de una tarea concreta cuyo resultado se convierta en un objeto de repercusión social. De esta forma cumple con los tres aspectos: saber, saber hacer y saber ser que conforman la filosofía de la educación por competencias.

Tal como se menciona en el trabajo de A. Tironi y otros [4], las competencias o características personales deseables para desarrollar una actividad laboral son:

- Competencias culturales
- Buena comunicación
- Independencia de criterio
- Facilidad de relacionarse con los demás
- Actitud reflexiva y conciente
- Comprensión de la función empresaria
- Entusiasta, proactivo
- Rapidez intelectual
- Experiencia en becas o pasantías
- Conciencia social solidaria
- Firme educación general básica
- Pensamiento crítico
- Cualidades de líder y de mediador
- Conocimientos de computación
- Interés por su perfeccionamiento
- Apariencia responsable y madura

La articulación entre la Universidad y la Enseñanza Media a través de la realización de una práctica conjunta genera nuevas expectativas en los futuros ingresantes al ponerlos tempranamente en relación con los requerimientos del nivel superior y el modo de trabajo universitario. De esta forma, ayuda a los estudiantes a definir los campos de interés sobre los cuales elegirán su futura carrera universitaria. Bajo estas consideraciones la UIDET UNITEC propicia un espacio articulador entre Escuela Media – Universidad por medio del diseño y ejecución de sistemas sustentados en la electrónica y la informática que permitan la inclusión social de personas con discapacidad.

La Tabla 1 brinda información del número de alumnos secundarios que participan de esta experiencia. La participación es voluntaria, dado que se pueden cumplimentar las horas de las prácticas profesionalizantes en otras organizaciones o empresas elegidas por el propio establecimiento escolar.

Tabla 1. Cantidad de alumnos secundarios en UNITEC

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Alumnos secundarios	2	6	8	8	8	16	21	16

Desde que se está llevando a cabo este proyecto nueve alumnos han ingresado a carreras de Ingeniería, tanto en la Universidad Nacional de La Plata como en la Universidad Tecnológica Nacional, dos alumnos han ingresado en Informática y otros dos alumnos que obtuvieron el título de Técnico en Electrónica se encuentran desarrollando actividad profesional en empresas de la zona. Algunos otros han ingresado a carreras universitarias pero no del tipo científico-tecnológicas.

En la Figura 1 se observa a distintos alumnos realizando diferentes actividades en UNITEC, adaptación de pianito para mellicitas de dos años con parálisis cerebral, reparación de dispositivos, y desarrollo de mouse adaptado.



Figura 1. Alumnos realizando sus PP (Fuente: Elaboración Propia)

## CONCLUSIONES

En el esquema de la sociedad del conocimiento y de la información, en el que las demandas a los profesionales se vinculan estrechamente con las competencias desarrolladas en los distintos niveles de formación, se hace necesario repensar las estrategias de enseñanza y de aprendizaje para que esta adquisición de competencias sea real y la articulación en la enseñanza sea una realidad que permita facilitar la inclusión laboral en todos los niveles.

Durante años los docentes han observado que los alumnos antes de entrar al mercado laboral no están totalmente conscientes de las habilidades y competencias que han desarrollado, y tampoco saben cómo aplicarlas en el desempeño cotidiano del trabajo.

Tal como se indica en el trabajo de Y. Argudín Vázquez [5], las competencias, igual que las actitudes, no son potencialidades a desarrollar porque no son dadas por herencia ni se originan de manera congénita, sino que forman parte de la construcción persistente de cada persona, de su proyecto de vida, de lo que quiere realizar o edificar y de los compromisos que derivan del proyecto que va a realizar. La construcción de competencias debe relacionarse con una comunidad específica, es decir, desde los otros y con los otros (entorno social), respondiendo a las necesidades de los demás y de acuerdo con las metas, requerimientos y expectativas cambiantes de una sociedad abierta. En el caso de UNITEC, esta relación se da con una comunidad poco atendida hasta estos días, como es el caso de las personas con discapacidad y las necesidades que se derivan de ellas.

El proceso de enseñanza-aprendizaje basado en competencias implica la creación y aplicación de métodos que permitan una nueva forma de relación docente-alumno, para que el estudiante asuma el protagonismo de las actividades que realiza en forma proactiva para llegar a ser el profesional competente que ansía la sociedad. En el caso de los alumnos secundarios que acceden a las PP en UNITEC se comprueba al final de cada año la construcción personal de las mencionadas competencias: trabajo en equipo, mejora en la comunicación verbal y escrita, desarrollo de aptitudes como la proactividad, la toma de decisiones, etc.

## BIBLIOGRAFÍA.

- [1] AGUERRONDO, I. (2009) Niveles o ciclos. El reto de la articulación. IPEE/UNESCO Sede Buenos Aires. *Revista Internacional Magisterio*, N° 38 – Bogotá, Colombia
- [2] DÍAZ BARRIGA A. (2006). El enfoque de competencias en la educación. *Perfiles Educativos*, vol. XXVIII, núm. 111, 7-36
- [3] Conferencia Mundial sobre la Educación Superior. (1998). La educación superior en el siglo XXI: Visión y acción, [http://www.unesco.org/education/educprog/wche/declaration\\_spa.htm](http://www.unesco.org/education/educprog/wche/declaration_spa.htm)
- [4] TIRONI, A.; GRASSELLI, M.C. & KESSLER, T. Aporte de los trabajos prácticos de laboratorio de Físicoquímica para el desarrollo de competencias del Ingeniero Químico, *Experiencias docentes en Ingeniería*, 2007.
- [5] ARGUDÍN VÁZQUEZ, Y (2001). Educación basada en competencias. *Revista de Educación*. Nueva Época N°16, 2001

## ESTADÍSTICAS HISTÓRICAS DE ENSAYOS REALIZADOS EN AISLADORES PARA LÍNEAS AÉREAS DE ALTA TENSIÓN

Pablo Morcelle del Valle, Leonado J. Catalano, Raúl E. Álvarez.

Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos, Facultad de Ingeniería, UNLP. Calle 48 y 116, 1900 La Plata. E-mail: pablo.morcelle@ing.unlp.edu.ar.

### INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los equipos eléctricos, durante el proceso de compra venta y previamente a su puesta en servicio, se realizan ensayos de recepción con el fin de verificar la calidad de los elementos. En el caso de los aisladores de porcelana que se utilizan para conformar las cadenas (Fotos 1 y 2), los ensayos de recepción de un lote se realizan de sobre una muestra o cantidad representativa del total de aisladores involucrados en dicho proceso de compra venta.



Foto 1. Aisladores U70BL color marrón



Foto 2. Aisladores U70BL color gris

Aisladores para cadena

La norma de aisladores de la Comisión Electrotécnica Internacional, IEC 60383-1 [1], estipula la realización de 8 ensayos sobre la muestra del lote de aisladores. Dichos ensayos tienen como objetivo comprobar el estado constitutivo desde el punto de vista de la fabricación (materiales, dimensiones, etc.) y el comportamiento mecánico, térmico y eléctrico.

En este trabajo se presenta un análisis estadístico del desempeño de aisladores de diferentes lotes, a partir de ensayos realizados de acuerdo a la norma [1]. El análisis tiene en cuenta los ensayos realizados en aisladores de porcelana durante casi 40 años en el Laboratorio de Alta Tensión de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Plata. Se distinguen los ensayos con más frecuencia de falla y se analizan, en la medida de lo posible, las causas de dichas fallas.

### Ensayos según norma

La norma [1] estipula que la muestra del lote de aisladores debe subdividirse en dos submuestras E1 y E2, de acuerdo al tamaño del lote, y que cada submuestra debe ser sometida a una serie diferente de ensayos, realizados en una secuencia determinada (Tabla 1 de [1]).

De la serie de ensayos mencionada, se realizan en el IITREE actualmente los siguientes:

- Verificación dimensional (cláusula 17 de [1])
- Electromecánico de falla (cláusula 18 de [1])
- Ciclado térmico (cláusula 23 de [1])
- Porosidad (cláusula 25 de [1])



- e) Verificación de la calidad del galvanizado (cláusula 26 de [1])
- f) Frente escarpado (cláusula 15.2 de [1])
- g) Verificación del desplazamiento axial y radial (cláusula 21 de [1])
- h) Verificación del sistema de enclavamiento (cláusula 22 de [1])

Debido a que las pruebas f), g) y h) son de incorporación relativamente reciente, éstas no fueron tenidas en cuenta en el presente estudio, dado que el número de elementos ensayados se estimó insuficiente para ser considerados en la estadística.

### Objetivos

El objetivo del presente trabajo consistió en detectar aquellos ensayos que presentaran mayor índice de falla, de tal forma de brindar herramientas a los fabricantes para intensificar los controles en la manufactura de las partes del aislador relacionadas con dichas pruebas.

### Ensayos y sus resultados estadísticos

A continuación se describen brevemente los ensayos a) a e) del punto 2, y se detallan para cada tipo de ensayo los porcentajes de falla resultantes, elaborándose finalmente una serie de conclusiones que, a juicio de los autores, son representativas de los resultados obtenidos.

#### Verificación dimensional

##### Breve descripción

El procedimiento para la realización de este ensayo se encuentra en el punto 17 de [1].

Se debe verificar que las dimensiones de los aisladores seleccionados coinciden con las indicadas en los planos a que se refiere, prestando especial atención a las medidas sujetas a tolerancias especiales indicadas por la norma.

Además, para el caso de las rótulas y los alojamientos definidos por [2] debe controlarse la intercambiabilidad del aislador mediante la verificación por calibres de acoplamiento. Las Fotos 3; 4 y 5 muestran los calibres utilizados y los controles mediante algunos de los calibres mencionados.



Foto 3. Calibres de la norma IEC 60120



Foto 4. Verificación de la rótula



Foto 5. Verificación del alojamiento y caperuza

#### Ensayo electromecánico de falla

##### Breve descripción

El procedimiento para la realización de este ensayo se encuentra en el punto 18 de [1].

Se ensayan los aisladores de la muestra E1. Los mismos deben ser sometidos individual y simultáneamente a un esfuerzo de tracción y a una tensión de frecuencia industrial entre sus partes metálicas. La tensión eléctrica debe estar aplicada durante todo el ensayo.

Debe tenerse especial cuidado de que las piezas de fijación de la máquina de ensayo estén de acuerdo con [2] para los aisladores de caperuza y badajo. Las Fotos 6 y 7 muestran las piezas de fijación y un aislador montado en la máquina de ensayo.



Foto 6. Alojamiento y vástago para acople a rótula



Foto 7. Aislador montado en la máquina de ensayo

### Ciclado térmico

#### Breve descripción

El procedimiento para la realización de este ensayo se encuentra en el punto 23 de [1].

Se ensayan todos los aisladores de la muestra (E1+E2). Se deben preparar dos baños de agua, uno frío (a temperatura ambiente) y otro caliente a una temperatura 70 K superior a la del baño frío. Los mismos deben ser sumergidos rápida y completamente en el baño caliente y mantenidos durante 15 minutos. Pasado este tiempo, se deben retirar y sumergir inmediata y rápidamente en el baño frío. El tiempo de inmersión en el baño frío es el mismo que para el baño caliente. Este ciclo debe repetirse tres veces. Finalizado el tercer ciclo, los aisladores deben ser examinados para verificar la ausencia de grietas, luego de lo cual, se deben someter a un ensayo de frecuencia industrial de 1 minuto.

Las Fotos 8 y 9 muestran algunas secuencias del ensayo de ciclado térmico realizados en el IITREE.



Foto 8. Inmersión de aisladores en los baños



Foto 9. Aisladores en el baño caliente

### Verificación de la ausencia de porosidad

#### Breve descripción

El procedimiento para la realización de este ensayo se encuentra en el punto 25 de [1].

Se ensayan los aisladores de la muestra E1. Se deben sumergir trozos de porcelana de los aisladores de la muestra en una solución alcohólica de fucsina al 1%, la cual debe mantenerse a una presión igual o mayor que 15 MPa durante un tiempo tal que el producto de la presión en MPa por el número de horas no sea inferior a 180. Finalmente se sacan los trozos, se lavan, se secan, se rompen y mediante inspección ocular se debe verificar que el colorante no penetró en el material. Las Fotos 10 y 11 muestran la cámara de presión del IITREE durante un ensayo de porosidad y las muestras luego de finalizado el mismo.





Foto 10. Cámara de presión para el ensayo de porosidad



Foto 11. Trozos de porcelana luego del ensayo de porosidad preparados para la observación

### Verificación de la calidad del galvanizado

#### Breve descripción

El procedimiento para la realización de este ensayo se encuentra en el punto 26 de [1].

Se ensayan los aisladores de la muestra E2. Hay diversos métodos previstos en la norma para la realización del ensayo de galvanizado; básicamente se mencionan el método gravimétrico según [3] o el método microscópico según [4]. El punto 26 de [1] también indica que, por acuerdo entre fabricante y comprador se podrán utilizar otros métodos de ensayo, como la inmersión en sulfato de cobre o el método gasométrico.

En el LAT-IITREE-FI-UNLP este ensayo se ha efectuado históricamente mediante la inmersión en sulfato de cobre según el punto 31.1 de [5], el cual permite evaluar la uniformidad de la capa de galvanizado, siendo éste método el que se utilizó para evaluar resultados en este estudio.

#### Resumen de resultados

La Tabla I muestra un resumen de los resultados discriminados por ensayo, indicándose la cantidad de muestras, el total de aisladores sometidos a ensayo en cada caso; así como la cantidad de muestras y de aisladores que no aprobaron cada prueba.

Como ya se mencionó, no todos los aisladores que conforman los lotes no aprobados presentaron falla en forma individual, por lo que las cantidades de aisladores sólo se presentan para tener idea de la cantidad de elementos involucrados en las diferentes pruebas.

Con relación a lo anterior, se destaca nuevamente que los resultados de la evaluación de cada lote se realiza en base al comportamiento de cada muestra en los respectivos ensayos y no según las cantidades individuales de aisladores fallados.

TABLA I. Resultados de los ensayos

Ensayo	Cantidad de muestras ensayadas	Cantidad de aisladores de la muestra	Muestras no aprobadas		Aisladores no aprobados	
			Cantidad	[%]	Cantidad	[%]
Verificación dimensional	42	614	14	33,3	198	32,2
Electromecánico de falla	62	561	11	17,7	139	24,8
Ciclo térmico	59	818	0	0,0	0	0,0
Porosidad	37	278	5	13,5	35	12,6
Galvanizado	26	101	5	19,2	14	13,9

### 1.1 Gráficos de distribución en el tiempo de los ensayos

Las Figuras 1 a 5 muestran la distribución en el tiempo de los ensayos realizados, detallando cantidad de muestras ensayadas y no aprobadas para cada tipo de ensayo.

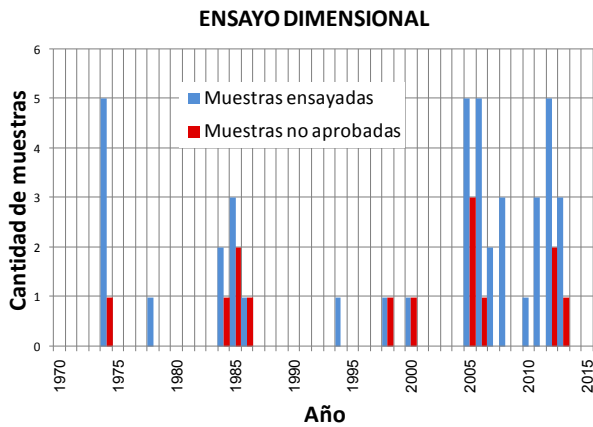


Figura 1. Ensayo de verificación dimensional

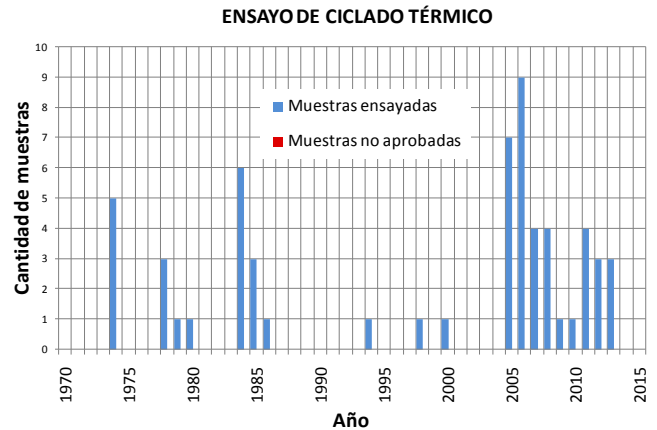


Figura 2. Ensayo de ciclado térmico

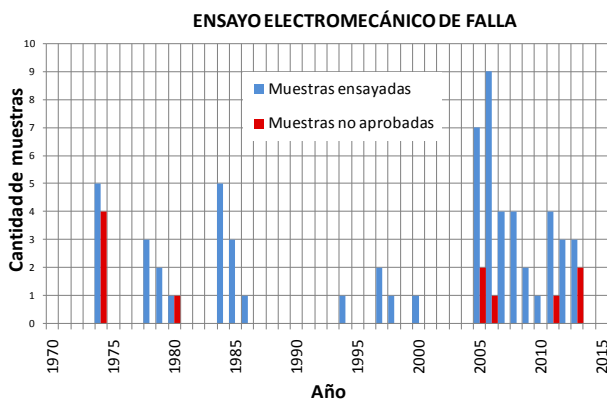


Figura 3. Ensayo electromecánico de falla

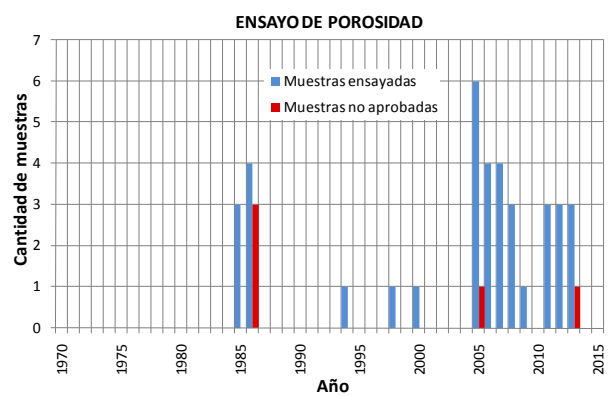


Figura 4. Ensayo de porosidad

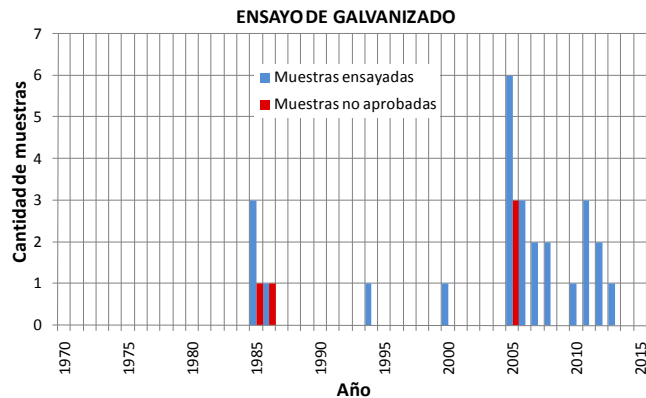


Figura 5. Ensayo de verificación de la calidad del galvanizado

## CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos y de los gráficos presentados se puede observar que el ensayo que presenta mayor índice de no aprobación es el dimensional. A continuación, en porcentajes similares, se ubican el de galvanizado, el electromecánico y el de porosidad. También se observa que todas las pruebas de ciclado térmico registradas resultaron aprobadas.

Con relación al ensayo dimensional, se puede verificar de la Figura 1 la persistencia de altos índices de no aprobación a lo largo del tiempo y hasta la actualidad. Es una cuestión no menor la necesidad de cumplir con las dimensiones de los aisladores, en particular con las referidas a los alojamientos de rótula. En la norma [2], se puede observar que algunas tolerancias de los calibres son del orden de las milésimas de milímetro. Esto es razonable teniendo en cuenta que este tipo de elementos de cadena son susceptibles de utilizarse para realizar reemplazos durante el mantenimiento de las líneas. Estas tareas muchas veces se efectúan bajo tensión, con lo cual dicha operatoria de reemplazo debe realizarse de la manera más expeditiva posible, y ésto sólo es factible si se cumplen las condiciones de intercambiabilidad de los elementos, garantizado mediante la estricta aplicación de la norma mencionada.

Cabe mencionar que, de la observación detallada de las piezas metálicas fuera de tolerancia (pernos y caperuzas), en muchos de los casos se ha observado que las causas de dicha falla podrían deberse al poco cuidado en la terminación de las superficies, como por ejemplo rebabas mal desbastadas o excesos (chorreo) del material del galvanizado (Foto 12).



Foto 12. Detalle de un badajo con defectos de la capa de galvanizado.

El ensayo de tracción electromecánica suele ser uno de los ensayos de la serie que más interés despierta por parte de usuarios y fabricantes. En la Figura 3 se puede observar que

aún en los registros más actuales se siguen obteniendo significativos índices de no aprobación. No debe olvidarse que la falla de uno de los elementos que forma la cadena, que puede ocurrir por causas tanto eléctricas como mecánicas, termina dando origen a la falla de la cadena completa. Se estima que una de las causas de la no aprobación de este ensayo es la dificultad de los fabricantes de obtener elementos cuya carga electromecánica de falla sea uniforme entre ciertos límites, tal como exige la norma [1] mediante la aplicación del criterio estadístico impuesto.

## 2. REFERENCIAS

- [1] Norma IEC 60383-1:1993 “Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1 kV. Part 1: Ceramic or glass insulator units for a.c. systems. Definitions, test methods and acceptance criteria”.
- [2] Norma IEC 60120:1984 “Dimensions of ball and socket couplings of string insulator units”.
- [3] Norma ISO 1460 “Metallic coatings - Hot dip galvanized coatings on ferrous materials - Gravimetric determination of the mass per unit area”.
- [4] Norma ISO 1463 “Metallic and oxide coatings - Measurement of coating thickness - Microscopical method”.
- [5] Norma IEC 60383:1976 “Test on insulators of ceramic material or glass for overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V”

## DESEMPEÑO DEL RECEPTOR GNSS DE MÚLTIPLES ANTENAS

Cogo, Jorge; Díaz, Juan G.; López La Valle, Gerardo R.; López, Ernesto M.; Puga, Gerardo L.; Rodríguez, Santiago; Scillone, Germán; Smidt, Javier A.; García, Javier G. y Roncagliolo, Pedro A.

Dpto. de Electrotecnia, FI-UNLP, 48 y 116, La Plata CC, 91 - Contacto:

[jorgecogo@gmail.com](mailto:jorgecogo@gmail.com)

### INTRODUCCIÓN

Los receptores de señales GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite) prestan servicio en una amplia variedad de aplicaciones donde es necesario determinar la posición, velocidad y hora precisa de un usuario o grupo de estos, ya sea en tiempo real o mediante postprocesamiento [1][2][3]. En general, para la correcta recepción de las señales electromagnéticas transmitidas por los satélites es suficiente contar con una única antena correctamente orientada. No obstante, en una gran variedad de vehículos aeroespaciales este requisito se torna difícil de satisfacer debido por un lado a los cambios en la orientación a los que se encuentra sometido el vehículo durante el vuelo, y por otro a que existen una serie de restricciones de diseño importantes sobre las posibles ubicaciones de la antena en el cuerpo del vehículo.

Una solución consiste en utilizar N antenas distribuidas espacialmente con diferentes orientaciones sobre la superficie del vehículo. Asociado a cada antena se requiere contar con una etapa de acondicionamiento en RF, una etapa de digitalización y una etapa de procesamiento digital, lo que implica diseñar un receptor *ad-hoc*. En [4] se presentó un trabajo con el diseño de un receptor GPS/GLONASS de cuatro antenas basado en estos requerimientos.

En todo proceso de desarrollo e innovación tecnológica resulta de particular importancia la planificación y realización de ensayos que permitan evaluar el desempeño, tanto en etapas tempranas a los efectos de introducir correcciones y mejoras, como en el diseño final a los efectos de validar el mismo. Para ello se requiere contar con el instrumental adecuado y diseñar correctamente los experimentos.

En este trabajo se presentan los experimentos más significativos que se realizaron, y los resultados que se obtuvieron, los cuales han permitido la evaluación del desempeño del prototipo desarrollado.

### DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Para llevar a cabo los experimentos se contó con un simulador de constelaciones GNSS, que permite generar las señales que recibiría un receptor GNSS en diferentes situaciones de trayectoria dinámica de usuario, condiciones atmosféricas, visibilidad de satélites, patrón de radiación de la antena receptora, etc. lo que se denomina *escenario de simulación*.

Para los ensayos se utilizaron tres escenarios diferentes, que consideran tres posibles situaciones del comportamiento del usuario:

1. Estático: posición por defecto, 0° de latitud, 0° de longitud, 0 m de altura sobre el elipsoide, que se mantiene constante durante todo el intervalo.
2. Dinámico:
  - a. De 0 a 120 segundos: posición estática por defecto.
  - b. A partir de 120 segundos: aceleración constante de 50 m/s<sup>2</sup> en la línea perpendicular al plano tangente local (coordenada x ECEF), hasta alcanzar una magnitud de velocidad de 8000 m/s (instante 280 segundos).
  - c. De ahí en adelante, se mantiene la velocidad constante.

Además, en diferentes ensayos se configuraron las potencias de señal transmitida por los satélites de las constelaciones GPS y GLONASS de manera que correspondan a diferentes valores de la relación de potencia de portadora a densidad espectral de potencia de ruido,  $C/N_0$ , observados por el receptor. Este ajuste se realizó calculando de manera teórica los niveles de ruido y de señal presentes en la entrada de antena, en función de los valores configurados, y se validó relevando las estimaciones de  $C/N_0$  que realizó el receptor durante el seguimiento de las señales.

Como ensayos representativos de la operación del receptor se seleccionan el ensayo de la tarea de adquisición, que permite verificar la correcta recepción de las señales así como la sensibilidad del receptor en diferentes escenarios de relación señal a ruido; y de la tarea de navegación puntual, que permite una verificación punta a punta de la operación del receptor.

### Ensayo de Adquisición

La tarea de adquisición del receptor es la encargada de detectar y realizar el primer sincronismo de las señales GNSS presentes en la antena. Esta tarea se ejecuta cada vez para un determinado satélite que se desea adquirir, y presenta dos resultados posibles:

1. No se detectó la señal.
2. La señal fue detectada y sincronizada.

Asumiendo que el satélite que se está buscando está realmente presente, el resultado de la operación es una variable aleatoria que depende del valor de  $C/N_0$ . Definimos la *Probabilidad de Adquisición*,  $P_a$ , como la probabilidad de que, dado que se está buscando un satélite que está realmente presente, se obtiene como resultado del algoritmo la detección y sincronismo de la señal, es decir, el resultado 2.

Se utilizó el escenario estático configurando la potencia de manera de observar 35, 36, 37, 38, 39, 40 y 45 dB de  $C/N_0$ , en sucesivos ensayos; realizando en cada uno 100 intentos de adquisición, y relevando los resultados.

A los efectos de interpretar de manera más sencilla los resultados se configuró al receptor de manera que solamente realice la búsqueda de los satélites presentes en el escenario de simulación. Además, se introdujo una variación en el *software* para que una vez que se completa la tarea de adquisición con un resultado exitoso no se pase a seguimiento de señal (lo que se haría en operación nominal). De esta manera, el receptor sólo realizará la tarea de adquisición una y otra vez, recorriendo los satélites que se configuraron para búsqueda, lo que acorta el tiempo de realización del ensayo. Se agregó también la impresión de mensajes que indiquen el resultado obtenido en la adquisición.

### Ensayo de Navegación Puntual

La navegación consiste en obtener, en determinados instantes separados regularmente, la posición y velocidad del usuario en base a las mediciones de los sistemas GNSS. En el receptor ensayado estos intervalos corresponden a 1 segundo (tasa de 1 Hz en la navegación). Denominamos navegación puntual cuando este cálculo se realiza en cada instante en base a únicamente las mediciones presentes en dicho instante; diferenciándose de la solución por filtrado, que involucra mediciones de diferentes instantes.

Para obtener esta solución se utilizan los algoritmos denominados de Bancroft [5] (posición) y mínimos cuadrados [2]; para la operación de los cuales se requiere de la información provista por una serie de tareas:

- Sincronización de cada una de las señales GNSS adquiridas a diferentes niveles, y obtención de los denominados *tiempos de transmisión*.
- Demodulación del mensaje de navegación (efemérides o parámetros orbitales de los satélites GNSS).
- Cálculo de posición y velocidad de los satélites GNSS involucrados en la navegación (en los instantes correspondientes a los *tiempos de transmisión*).
- Cálculo de las correcciones a aplicar a las mediciones.
- Armado de mediciones de pseudo-rango y delta-rango.



Básicamente, esta información consta de las mediciones de pseudo-rango y delta-rango [2] y de las posiciones y velocidades de los satélites, tanto para GPS como para GLONASS. Para el ensayo se utilizan los escenarios Estático y Dinámico, configurando las potencias de señal de modo de obtener 45 dB de  $C/N_0$ , correspondientes a buena recepción de señal. En cada caso, se contrasta la solución de posición y velocidad obtenida por el receptor con los valores que se configuraron para el simulador.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se presentan los resultados de probabilidad de adquisición (adquisiciones correctas sobre un total de 100 ensayos) en función de la relación  $C/N_0$  tanto para el caso de GPS como de GLONASS. Se presenta también la curva teórica de probabilidad de detección.

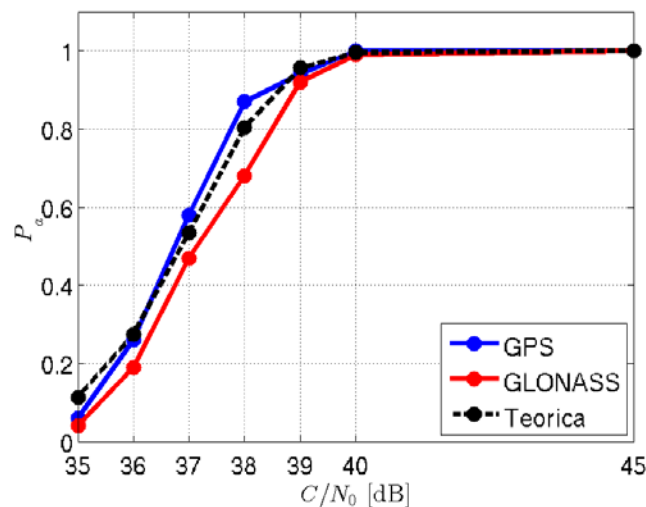


Figura 1: Resultados del ensayo de adquisición y comparación con los resultados teóricos.

En este ensayo se observó una buena correspondencia entre los resultados obtenidos con ambos sistemas contra la predicción teórica; lo cual permitió validar mediante el uso de simulador GNSS la correcta operación de las rutinas de adquisición de señal implementadas en el receptor.

En las Figuras 2 y 3 se presentan respectivamente el error de posición en las tres coordenadas, y el error de velocidad en las tres coordenadas en función del tiempo para el caso de un usuario Dinámico, utilizando las señales del sistema GPS. En ellas se agregan dos líneas punteadas en gris indicando los instantes de inicio y fin de la aceleración; 120 segundos y 280 segundos, respectivamente. Resultados similares se obtuvieron para el ensayo en condiciones estáticas (que no se presentan por cuestiones de espacio). Además, resultados similares se obtuvieron en caso de utilizar las señales de la constelación de GLONASS (que no se presentan por cuestiones de espacio).

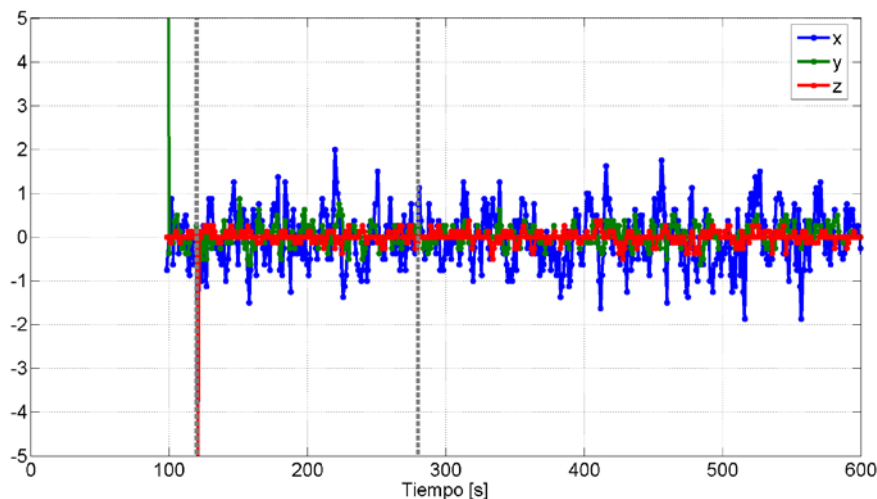


Figura 2: Error de posición en las tres coordenadas para el caso de GPS con usuario Dinámico [metros].

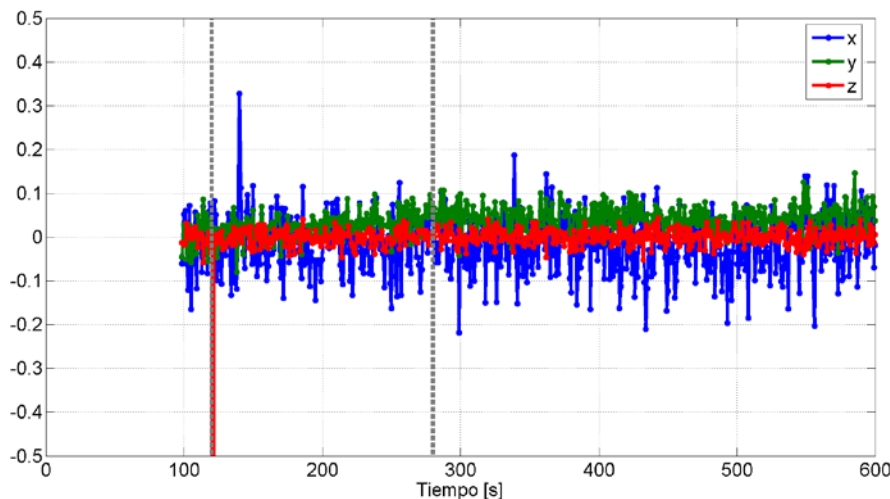


Figura 3: Error de velocidad en las tres coordenadas para el caso de GPS con usuario dinámico [metros/segundo].

Se puede observar que el error de posición se encuentra en el orden del metro y el error de velocidad en el orden de 0,1 metros/segundo. Estos resultados, obtenidos en una situación de alta dinámica, permiten verificar el correcto comportamiento de la navegación (y de todas las rutinas involucradas en ella). Una salvedad es que en el instante de aplicación de la aceleración se observa un error puntual tanto en posición (del orden de 5 metros) como en velocidad (del orden de 15 metros/segundo). Este comportamiento es esperable, dado que en ese instante se somete a los lazos de seguimiento de señal a una condición extrema (para la cual han sido diseñados, pero en la que presentan un transitorio que se traduce en error en las mediciones).

Finalmente, en las Figuras 4 y 5 se presentan en 3 dimensiones los errores en las soluciones de posición y velocidad observados en todo el intervalo analizado, para el caso de usuario dinámico, y utilizando las señales de las constelaciones GPS y GLONASS, respectivamente.

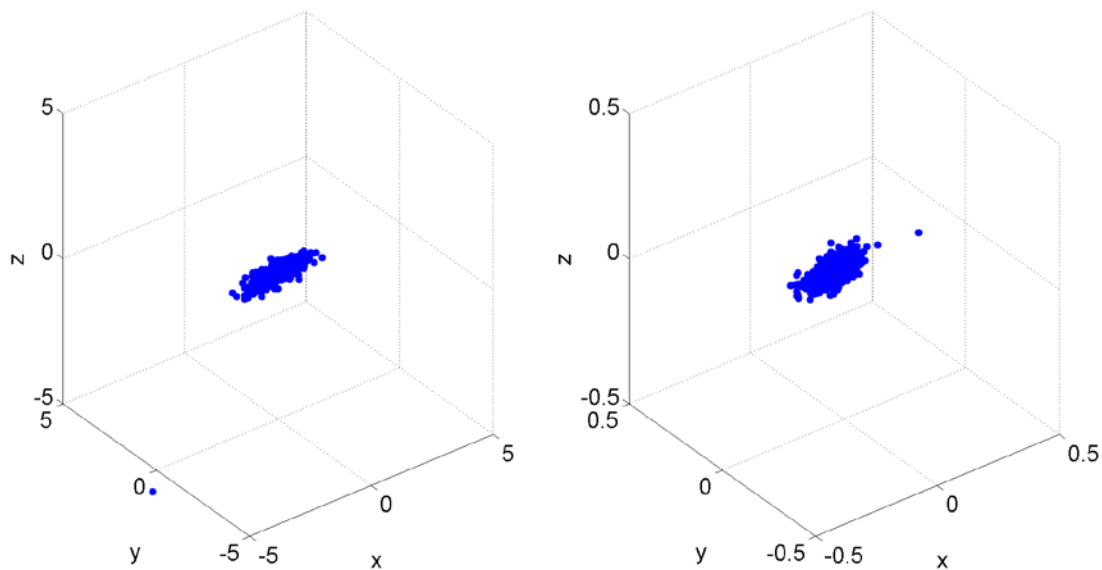


Figura 4: Errores de posición (izq.) y velocidad (der.) para el ensayo de GPS con usuario dinámico.

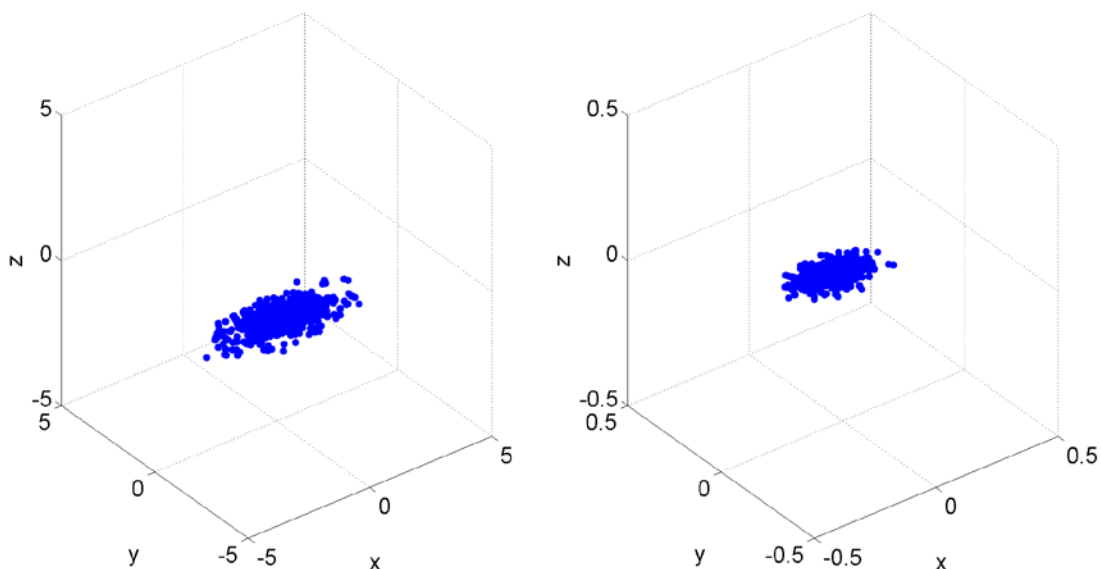


Figura 5: Errores de posición y velocidad para el ensayo de GLONASS con usuario dinámico.

Se puede observar que el comportamiento para ambos sistemas GNSS es adecuado. La mayor componente del error tiene lugar en coordenada  $x$ , lo cual es esperable por consideraciones geométricas, dado que esta componente corresponde a la coordenada local de altura, que resulta más difícil de resolver dado que todos los satélites se encuentran sobre la ubicación del receptor (condición natural de operación con señales GNSS). Por otra parte, la mayor dispersión del error observada en la solución con el sistema GLONASS responde simplemente a que se cuenta en promedio con un menor número de mediciones (la constelación GLONASS cuenta con una constelación de 24 satélites mientras que GPS posee 32).

## CONCLUSIONES

Se observó una buena correspondencia entre los resultados obtenidos en la adquisición de señales de ambos sistemas, GPS y GLONASS, con la predicción teórica. Esto permitió validar la correcta operación y desempeño de las rutinas de adquisición de señal implementadas, y además verificar que no existían inconvenientes que perjudicaran la sensibilidad del receptor.

También se observó una muy buena correspondencia entre las soluciones de navegación provistas por el receptor, y las configuradas en el escenario de simulación, lo que demuestra un comportamiento adecuado de las rutinas de navegación en condiciones de alta dinámica. Esto permite validar en un ensayo de “punta a punta” la operación del receptor como sistema, ya que para obtener este desempeño todas las tareas y componentes involucrados deben operar correctamente.

Los resultados presentados corresponden a ensayos realizados una vez que se depuraron diferentes fuentes de error que daban lugar a distintas anomalías, destacando la importancia de contar con el instrumental adecuado, planificar de manera acorde y realizar este tipo de ensayos en todo proceso de desarrollo tecnológico.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Parkinson, Bradford W. and Spilker, James J. Jr. (editores); *Global Positioning System: Theory and Applications*; Vols. I y II; American Institute of Aeronautics & Astronautics; 1996.
- [2] Kaplan, Elliot D. and Hegarty, Christopher J. (editores); *Understanding GPS: Principles and Applications*; Second Edition; Artech House; 2005.
- [3] Hofmann-Wellenhof, Bernhard; Lichtenegger, Herbert and Wasle, Elmar; *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*; Springer; 2008.
- [4] Jorge Cogo, Ramón G. López La Valle, Gerardo L. Puga, Javier A. Smidt, Juan G. Díaz, Javier G. García, Pedro A. Roncagliolo y Carlos H. Muravchik; *Receptor GNSS Multiantena Para Aplicaciones Aeroespaciales*; Segundas Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión; FI-UNLP; 2013.
- [5] Bancroft, S.; *An Algebraic Solution of the GPS Equations*; IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems; tomo AES-21; págs. 56–59; 1985.

## ESTUDIO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE MOTORES ASINCRÓNICOS TRIFÁSICOS

Massa, Pablo      Trepat, Juan M.

Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.

Calle 48 y 116 - La Plata - Bs. As. Argentina.

juanmtrepat@gmail.com

Palabras claves: Eficiencia energética / Ensayos IEC 60034-2-1 / Motor asincrónicos trifásico.

### RESUMEN

Los motores asincrónicos trifásicos (MATs) requieren del orden del sesenta por ciento o más del consumo anual de electricidad en la industria. Esto se observa en nuestro país y en numerosos países del mundo. Para conceptualizar la importancia de dicho consumo, basta considerar que durante el año 2015 en Argentina [1], el consumo total de energía eléctrica fue del orden de los 125000 GWh de los cuales el sector industrial requirió 50000 GWh.

Ante la necesidad de reducir el consumo de energía y la emisión de gases del efecto invernadero, los gobiernos de diversos países han establecido un conjunto de requisitos mínimos de eficiencia energética, también conocidos como MEPS (Minimum Energy Performance Standards) [2] para diversos tipos de equipos de empleo en ámbitos residenciales e industriales. Esto incluye a los motores eléctricos en general y de inducción trifásicos en particular.

Surge así la importancia de realizar estudios y ensayos para conocer en detalle el rendimiento de los MATs. Los cambios que, a partir de nuevos diseños y materiales en su construcción, introducen las mejoras tecnológicas aplicadas a estos motores eléctricos, son validados en lo comercial mediante el denominado “etiquetado de eficiencia energética” que las legislaciones de cada país consideran de cumplimiento obligatorio. Dicho proceso de etiquetado es, en definitiva, un proceso de Certificación de Productos por alguno de los sistemas que lo caracterizan (marca, tipo, etc.) y que siempre requieren la realización de ensayos siguiendo procedimientos normalizados en el ámbito nacional e internacional.

Dada la importancia de disponer de medios para el ensayo de los MATs, se realiza a continuación el estudio de un banco de pruebas caracterizado por su versatilidad, fácil operatividad y bajo consumo de energía durante las pruebas (regenerativo), que compensaría un posible mayor costo inicial del banco con beneficios económicos a largo plazo.

El banco propuesto utiliza un MAT, gemelo al motor a evaluar, funcionando como generador, siendo así la carga del Motor Bajo Ensayo (MBE).

Se realiza una breve descripción de los métodos normalizados de ensayos de motores eléctricos asincrónicos, se analiza el funcionamiento de la máquina asincrónica como generador, se presentan los componentes del banco de prueba propuesto y se describe un caso típico de operación del banco para la determinación de la eficiencia energética de un MAT.

## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con un cronograma específico, será obligatorio en la Unión Europea (UE), Estados Unidos de Norteamérica (EE.UU), Brasil, China y otros países industrializados, la utilización de motores de alta y muy alta eficiencia. Para ello, como una forma de control y certificación, fabricantes y agencias gubernamentales deberán medir y etiquetar la eficiencia de los MATs, aplicando las normas que se indican en las siguientes referencias [3] [4] [5] [6].

En nuestro país está vigente la Disposición 230/2015 [7], de la secretaria de Energía de la Nación. La misma incorporara al régimen de certificación obligatoria la medición de eficiencia energética, con el fin de establecer, en tal sentido, niveles de eficiencia energética mínima o consumos de energía máximos para motores de inducción trifásicos de potencia nominal desde 0,75 kW (1 Hp) hasta 30 kW (40 Hp) inclusive. Para cumplimentar con dicha disposición, se adoptó la norma IRAM indicada en la referencia [8].

En la actualidad no existe una unificación mundial en la normativa que rige el proceso de medición de la eficiencia en MATs [9][10].

En particular, las normas internacionales IEC 60034-2-1[9] e IEC 60034-30-1 [10] establecen la forma de realizar el ensayo y la clasificación según su eficiencia de los motores de inducción trifásicos (MATs). Estas clasificaciones se denominan: IE1, E2, IE3, IE4. Nuestra norma nacional está en concordancia con esta normativa internacional

En la Fig. 1 se indican los valores de eficiencia para distintas potencias de salida de acuerdo a las diferentes clases de MATs de cuatro polos alimentados de una fuente de tensión eléctrica de 50Hz de frecuencia.

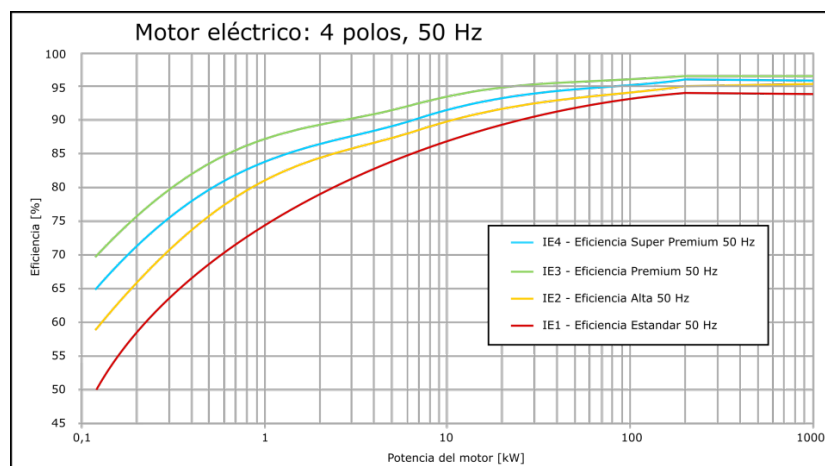


Figura 1. Eficiencia en función de la potencia para cada clase de MATs.

## DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO DE EFICIENCIA EN LOS MATs.

La eficiencia de un motor eléctrico está definida como la relación entre la potencia de salida (mecánica) y la potencia de entrada (eléctrica). La determinación de la eficiencia puede ser realizada mediante dos métodos: directo e indirecto.

El método directo consiste en la cuantificación de la potencia de salida mediante la medición de la cupla y de la velocidad en el eje de la máquina y la medición de la potencia eléctrica de entrada.



El método indirecto está basado en la determinación de cada tipo de pérdidas mediante la generación de sub-ensayos (separación de pérdidas). Las pérdidas totales son sustraídas de potencia de entrada, obteniéndose así la potencia de salida.

Cuando el alcance de las potencias de los motores a ensayar varía entre 0,75 a 30 kW, la norma IEC 60034-2-1 sugiere aplicar el método indirecto. Por el método de separación de pérdidas se determinarán las siguientes componentes: pérdidas en carga debido al efecto joule en el bobinado del estator y en las barras de la jaula de ardilla del rotor, pérdidas en el hierro, pérdidas por fricción y ventilación y pérdidas adicionales. Particularmente tres de los sub-ensayos requieren “cargar” al MAT y en consecuencia disponer de “bancos de ensayos” con “frenos” apropiados:

- Ensayo de temperatura a la carga asignada, consiste en hacer funcionar el motor con su carga nominal, alimentado con su tensión y frecuencia nominal hasta alcanzar su equilibrio térmico.
- Ensayo de curva de carga, se le aplican 6 niveles de carga, 25%, 50%, 75%, 100%, 125% y 150% de la carga nominal.
- Pérdidas adicionales, ensayo de curva de carga.

### **Tipos de “cargas” empleadas en los ensayos de motores eléctricos.**

Para “cargar” los motores eléctricos se utilizan dispositivos que, en forma controlada, proporcionan la cupla resistente o de frenado. Se denominan en general “frenos” y según la acción por la cual ejercen la cupla resistente se los clasifica en mecánicos de fricción (Prony), hidráulicos (Froude), y eléctricos (generador dinamopéndulo, o de corrientes parásitas). A excepción del generador dinamopéndulo, que tiene la opción de reinyectar la energía a la red, los demás frenos disipan la energía mecánica aplicada en su eje.

### **BANCO PROPUESTO**

Particularmente los sub-ensayos de “temperatura a la carga asignada” y de “curva de carga” requieren alcanzar, con el motor, cargado el equilibrio térmico, el cual, dependiendo de la potencia del MAT, y la cantidad de ensayos realizados en una jornada, se traduce en un desperdicio energético si se utilizan, como carga, frenos disipativos.

La capacidad de las máquinas asíncronas trifásicas de funcionar como motor o generador, de acuerdo a la velocidad relativa entre el eje y el campo magnético inducido, posibilita el uso de una MAT como freno. Una MAT opera como generador si la velocidad del rotor es mayor a la velocidad del campo rotante. Siendo la potencia de entrada, la potencia ejercida en su eje (por una máquina de impulso) y la potencia de salida la corriente eléctrica generada en el estator [11].

Una alternativa a los “bancos” convencionales, es la de usar un motor gemelo al que se va a ensayar como generador-freno (G-F). Utilizando un convertidor electrónico de potencia (CEP) que generen el G-F un campo rotante de velocidad menor a la del MBE, se desarrollará el par resistente necesario. El MBE y el G-F se acoplan mecánicamente con los medidores de cupla y velocidad electrónicos. En la Fig. 2 se muestra el esquema del banco propuesto.

Es posible optimizar, enérgicamente, los ensayos de eficiencia de MATs por cuanto se establece un flujo de potencia “circular” que utiliza energía de la red consumiendo únicamente las pérdidas del MBE, del G-F, de los CEP involucrados y las pérdidas en el acople mecánico, reinyectando lo restante a la red.

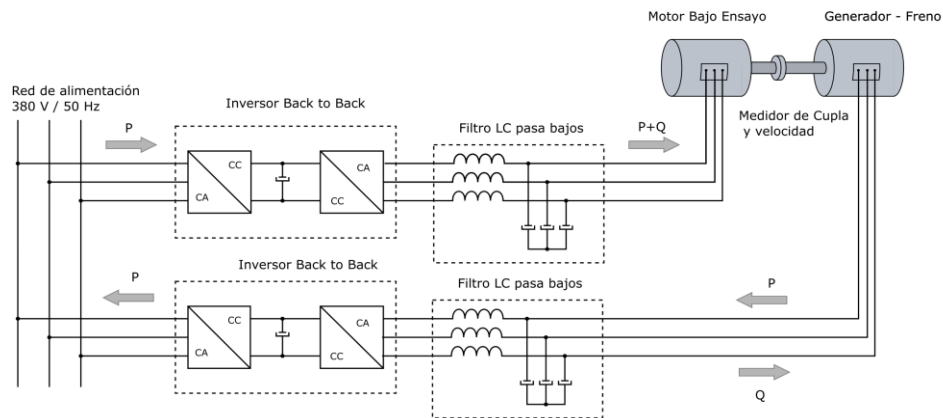


Figura 2. Esquema del banco de ensayo con flujo de potencia eficiente

De acuerdo a los requerimientos de los sub-ensayos, es necesario cargar al motor con varios estados de carga. Para esto es necesario, como primera característica, que el CEP tenga una resolución en frecuencia que permita generar campos rotantes, en el G-F, de velocidades cercanas. Siendo esto alcanzado por los CEP con control vectorial y encoders de alta resolución [12]. En la Fig.3 se muestra los distintos estados de carga del MBE impuesto por el G-F.

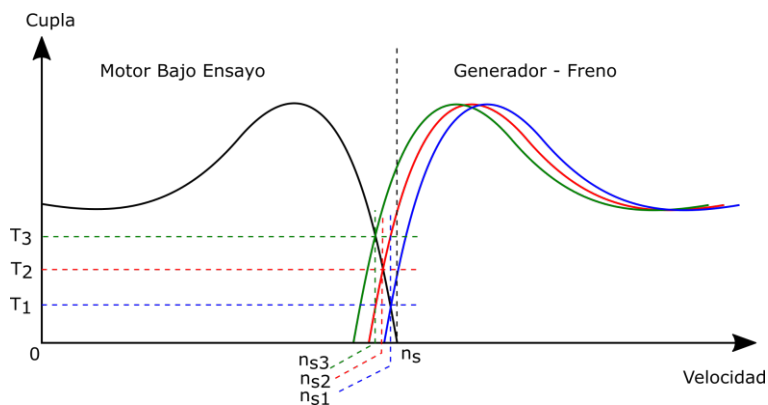


Figura 3. Motor y par resistente para distintos estados de carga.

La segunda característica que debe tener el CEP es la capacidad de operar en modo regenerativo. Esto es inyectar la potencia que entrega la salida del G-F a la red eléctrica. Esta característica lo logran los convertidores con topología Back to Back [13] [14], que son convertidores compuesto por dos inversores vinculados en su bus de continua. Esta topología permite controlar el flujo de potencia activa y reactiva de cada inversor en forma bidireccional, desacoplando los niveles de tensión y frecuencia que maneja cada inversor. Esto permite que el CEP absorba la potencia activa del G-F y la inyecta a la red y a la vez, entregue potencia reactiva al G-F.

### CÁLCULOS DE FRECUENCIAS DE CAMPOS ROTANTES APLICABLES AL G-F

Se calculan para MATs de 0,75 kW y 30 kW de 4 polos de 50 Hz las frecuencias del campo a aplicar al G-F para opera satisfactoriamente, considerando que las características de las máquinas en la zona de funcionamiento de trabajo normal son idénticas y de variación lineal entre la cupla y la velocidad. En la tabla 2 se muestran los resultados.



## CONCLUSIONES

El uso de un motor idéntico a la máquina a evaluar, como carga del banco y la aptitud que provee la electrónica de potencia para el intercambio de potencias entre fuentes y cargas, permiten de manera sencilla restituir la energía a la red de modo que en el proceso solo resultan no aprovechables las pérdidas de los elementos componentes del banco.

Al pretender ensayar distintos “tamaños” de motores caracterizados por rangos amplios de potencias y al menos dos frecuencias distintas (50 y 60 Hz) se simplifican los bancos por cuanto el “freno” al ser un motor gemelo se adapta fácilmente al conjunto.

El costo inicial del banco propuesto es superior al de un banco de ensayo con frenos convencionales, pero el ahorro energético y la flexibilidad de ensayar varios tipos de máquinas con mismo banco, permiten poder amortizar el costo inicial y obtener beneficios adicionales.

## REFERENCIAS

- [1] “Balance Energético Nacional 2015.Documento metodológico”, Centro de Información Energética Ministerio de Energía y Minería de la República Argentina, 2016.
- [2] “Energy efficiency roadmap for electric motors and motor systems”, Energy Efficient End user Equipment International Energy Agency, 2015.
- [3] IEC 60034-2-1: 2014”Rotatingelectrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)”.
- [4] IEC 60034-30-1: 2014”Rotatingelectrical machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code)”.
- [5] 112-2004 “IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators”.
- [6] C390-10 (R2015), “Test methods, marking requirements and energy efficiency levels for three-phase induction motors”.
- [7] Disp. DNCI 230/15Ref. Lealtad Comercial - Seguridad Eléctrica - Aparatos Eléctricos de Uso doméstico - Aparatos de fuerza motriz (motores de inducción).01/09/2015
- [8] IRAM 62045: 2012 “Etiquetado de eficiencia energética para motores de inducción trifásicos”.
- [9] Koo,D. H; Kim M. J., et all, "Comparison of the efficiency depending on test standards of three-phase cage induction machine" 18th International Conference on Electrical Machines, , 2008.
- [10] Angers Pierre, “Comparison of existing standard methods of determining energy efficiency for three-phase cage induction motors”, Proceedings of the 6th International Conference eemods '09: EnergyEfficiency in Motor Driven Systems
- [11]Mora, Jesús F. “Máquinas eléctricas”, (5ta ed.) McGraw Hill, Madrid, 2003.
- [12] “Comparison of Higher Performance AC Drives and AC Servo Controllers”, Yaskawa Electric America, 2004.
- [13] Yazdani, Amirnaser; Iravani, Reza “Voltage-Sourced Converters in PowerSystems : Modeling, Control, and Applications”, IEEE Press, Wiley, 2010.
- [14]Alcalá, Janeth; Charre,Saida et all “Análisis del Convertidor CA/CD/CA (Back to Back) para la Gestión del Flujo de Potencia”, Información Tecnológica – Vol. 25 N° 6 2014.

## PROPUESTA DE MEJORAS DIDÁCTICAS PARA UN CURSO DE ELECTROMAGNETISMO EN CARRERAS DE INGENIERÍA

Isidori, Alberto Nazareno<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> UIDET UNITEC, Departamento de Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 48 y 116, La Plata, Argentina, [aisidori@inifta.unlp.edu.ar](mailto:aisidori@inifta.unlp.edu.ar)

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias Básicas, FIUNLP.

### INTRODUCCIÓN

Los seres humanos tenemos diferentes capacidades, ya que además de los talentos individuales, existen también diversas oportunidades generacionales. En este sentido, los alumnos actualmente aptos para cursar carreras de ingeniería lo hacen en un contexto totalmente distinto al de varias décadas atrás.

Una ventaja para los estudiantes actuales es el acceso a la información que existe en la actualidad.

Como contrapartida, las exigencias son mayores debiéndose acortar los tiempos de cursada para salir rápidamente hacia algún emprendimiento laboral. Este fue uno de los motivos por los que, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, se decidió pasar de las clases magistrales y prácticas guiadas por personal auxiliar a las clases teórico prácticas. Las materias se dividieron para permitir cursadas cortas cambiándose el examen final por un régimen de promoción que no requiere presencia en clase, ni permite evaluaciones intermedias y corrección de carpetas de trabajos prácticos, siendo posible promocionar si el promedio de ambas evaluaciones parciales alcanza la nota 6 (escala 0-10 puntos). Por otra parte, cada parcial tiene su recuperación y la evaluación integradora inicialmente propuesta, se ha convertido en una segunda recuperación, con el agravante que los alumnos pueden cursar el segundo módulo sin haber rendido el primero.

### ANTECEDENTES

A pesar de las facilidades mencionadas, desde el inicio del sistema por promoción se pudo observar un incremento continuo en la cantidad de alumnos que debían volver a cursar la materia más de una vez, aumentando año tras año el número de inscriptos. Simultáneamente, se fueron modificando los requisitos para la cursada.

Hasta 2009, la inscripción a la cursada por promoción era un punto de no retorno: se promocionaba, aprobaba la cursada para rendir examen final o se desaprobaba.

Debido a que la cantidad de desaprobados era muy elevada, y considerando que no es justo que el alumno desaprobe si deja de cursar, se agregó la posibilidad de abandono, considerándose en tal condición al alumno que abandona la cursada disponiendo aún de posibilidades para aprobarla. Con esta medida se solucionó el problema de la baja injusta del promedio de algunos alumnos, pero no se resolvió el problema de fondo: la cantidad de alumnos que debe volver a cursar la materia sigue siendo la misma.

En este contexto, para los cursos por promoción para Física II dictados por el mismo profesor entre los años 2009 y 2012, promocionó el 21% de los alumnos que se presentaron a rendir al menos un parcial. Estos resultados no se apartan demasiado de las estadísticas oficiales para toda la Facultad de Ingeniería en el periodo 2002-2012 mostrados en la Tabla 1, pudiéndose comprobar que antes o después del cambio de planes de estudio, 80 de cada 100 ingresantes no se recibió después de 10 años de permanencia en la facultad, aumentando la cantidad de alumnos retenidos.

([http://www.ing.unlp.edu.ar/institucional/difusion/2012/acto\\_academico\\_noviembre](http://www.ing.unlp.edu.ar/institucional/difusion/2012/acto_academico_noviembre)),

Tabla 1

	Ingreso anual	retención	egreso anual	egreso anual%	retención anual%
antes de 2002	1000	3000	200	20	30
despues de 2002	1500	5400	330	22	36

Considerando que se trata de 80 de cada 100 alumnos, con un ingreso anual de 1500 alumnos lleva a la cifra de 12000 alumnos que no lograron recibirse, y de ellos, 5400 permanecieron diez años en la facultad. Por consiguiente, cualquier propuesta mejoradora deberá tener en cuenta esta situación.

Un serio problema pedagógico es que los alumnos acostumbran estudiar por resúmenes o por las presentaciones de clase que muestran detalladamente la realización completa de algunos ejercicios y que terminan siendo su principal fuente bibliográfica.

Otra de las fuentes a la que recurren los alumnos son los temas de evaluaciones anteriores que de alguna manera logran resolver y repetir, pero son incapaces de hacerlo ante una leve modificación de los enunciados. La búsqueda en la web de soluciones a los problemas de la guía de trabajos prácticos es otra costumbre en ascenso siendo la memorización de ejercicios el método de estudio al que finalmente se recurre.

Estos resultados, ¿son características inevitables del alumno, o nos exigen a los docentes una revisión de didáctica y contenidos?

Un alumno que llega a cursar Física II (Meneses Villagrà y Caballero Sahelices, 1995) en general carece de conocimientos previos sobre electricidad. En la segunda clase de electromagnetismo se le pide que calcule el campo eléctrico generado por una distribución continua de cargas y en cuarenta días tendrá que rendir el final con estos temas. Si promociona comenzará el segundo módulo comprobando que utiliza muy poco de lo que vio en el primero. Considerando que además está cursando las restantes materias del cuatrimestre, se puede concluir que los alumnos actuales carecen del tiempo suficiente para afianzar los conocimientos. Tal vez, por este motivo, memorizan parciales.

Como para el segundo módulo de Física II sólo se necesita conocer la resolución de circuitos eléctricos, es muy probable que olviden rápidamente los temas del primer módulo y hagan lo mismo con los del segundo, al comenzar las materias del cuarto cuatrimestre.

Ante este panorama, es necesario buscar una alternativa para lograr la motivación del alumno, acercándolo a situaciones reales, en lo posible afines a la profesión elegida, que permitan poner en práctica el conocimiento adquirido con anterioridad y animarse a avanzar con razonamientos propios (Moreno Olivos, 2011)

### **Afinidad con las profesiones**

Debido a que los temas tratados en Física II tienen poca relación con carreras profesionales como las Ingenierías en Construcciones, Civil e Hidráulica, no es fácil lograr el interés de los alumnos de estas carreras (Solbes, Montserrat y Furió, 2007). El argumento de la importancia que tienen estos temas como preparación para enfrentar las materias restantes de la carrera y en definitiva, como parte integral de la formación como ingeniero, pierden su efecto si se considera que gran cantidad de esos alumnos aprueba la materia cuando están muy próximos a la graduación. Obviamente, no sucede lo mismo con carreras para las cuales los temas de la asignatura son fundamentales y están considerados dentro del esquema de correlatividades.



Independientemente de la profesión elegida, los circuitos eléctricos son un punto común para la motivación. Todos hacemos uso de las ventajas de la electricidad y este es un punto de partida para lograr el interés del alumno (Girelli, Dima, 2011).

## **CARACTERÍSTICAS DE LA MODALIDAD ACTUAL**

Normalmente, los alumnos que cursan la materia y están en condiciones de hacerlo, se inscriben para cursar por promoción, aunque no todos están capacitados para seguir el ritmo impuesto por este tipo de cursadas, en la que se trata un tema diferente en cada una de las diez clases de cada módulo.

Por tratarse de dos clases semanales, llegada la tercera o cuarta clase del primer módulo, muchos de los alumnos se atrasan en la realización de los trabajos de la guía de ejercicios propuesta. Cuando están por comprender un tema ya se trató el siguiente y muchos de los que aprueban la cursada prefieren volver a cursar antes de enfrentarse al examen final.

Los malos resultados obtenidos en los exámenes finales pueden estar vinculados con el orden en que se tratan los contenidos durante la cursada y con el hecho de que cada módulo se puede considerar como una materia independiente, cuyos contenidos se podrían relacionar tratándolos en conjunto con el tiempo necesario. Este tiempo, en general, está limitado por la necesidad de promocionar para anotarse en la cursada siguiente.

Respecto a los contenidos, el tratamiento de los campos inducidos, tanto eléctrico como magnético, no se realiza con la misma intensidad con que se consideran los campos estáticos. Cuando comienza el estudio de la corriente eléctrica desaparecen los campos eléctricos, rigurosamente tratados hasta ese momento desde el comienzo de la cursada, pasándose a utilizar, sin justificación, modelos basados en circuitos. Al final de la cursada reaparecen los campos, utilizándose a veces la potencialidad de los operadores vectoriales que ocultan la física subyacente en la deducción de la ecuación de una onda electromagnética. Todo esto puede confundir al alumno, principalmente al no disponer de tiempo suficiente para relacionar los contenidos.

## **PROPUESTA METODOLÓGICA**

El punto de partida para modalidad propuesta se basa en la realización de laboratorios en los que el alumno pueda interactuar con el instrumental sin demasiadas complicaciones, introduciendo de manera conceptual los temas que más comúnmente deberán enfrentar en su profesión, independientemente del título obtenido, como ser la distribución de energía eléctrica, conversión en otras formas de energía, utilización de instrumental de medida, etc.

Llevar a cabo esta propuesta implica pasar el tratamiento de estos temas al primer módulo, trabajando sobre los conceptos de potencial, fuerza electromotriz, corriente, resistencia, capacidad e inductancia antes de pasar a la resolución de circuitos.

El desafío consistió en encontrar una manera de introducir estos temas conceptualmente, utilizando en algunos casos postulados que se demuestran en el segundo módulo mediante la teoría de campo.

## **Ejemplo de clases para iniciar el cambio**

Un ingeniero es aquel que mediante su ingenio transforma el conocimiento científico en aplicaciones útiles a la sociedad. Su trabajo consiste en tomar parte de la energía disponible en el planeta y transformarla adecuadamente para facilitar la vida de los seres humanos. Para lograrlo, debe conocer los diferentes modos en que se puede almacenar la energía y cómo se relacionan entre sí, más allá de que se utilice un modelo basado en teoría de circuitos o de campos.

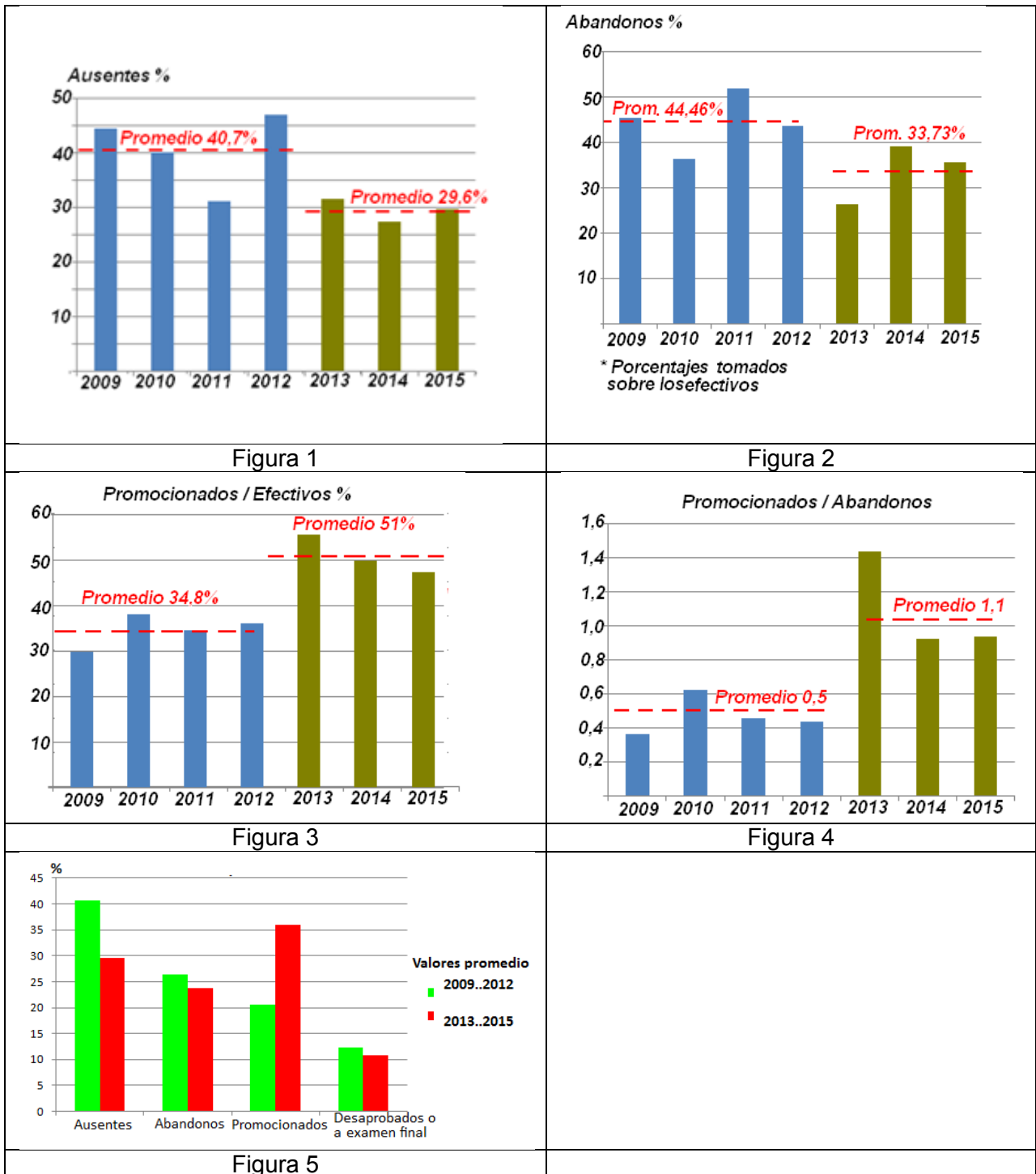
Con esta idea en mente, en la primera clase del curso se puede trabajar sobre la diferencia entre la fuerza eléctrica y la atracción entre masas, separación de cargas por frotamiento y carga de objetos por contacto e inducción. La transferencia de cargas entre objetos metálicos sirve para introducir el concepto de conducción de la electricidad. Finalmente, se utiliza el resultado experimental de Coulomb para definir la unidad de carga eléctrica y se asocia la modificación del espacio que rodea a un cuerpo cargado con un campo de fuerzas análogo al gravitatorio.

Aceptando que en el campo electrostático, como en el gravitatorio, se conserva la energía mecánica, se introduce en la segunda clase el concepto de energía potencial eléctrica, presentando al voltímetro como un instrumento que permite determinar la diferencia de potencial entre dos objetos cargados. Con la misma metodología, y siempre en forma gradual, relacionando los nuevos contenidos con los anteriores, se irán incorporando en la tercera, cuarta y quinta clase las nociones de capacidad, corriente y resistencia eléctrica, campo magnético y f.e.m inducida, que serán utilizados en las clases siguientes para resolver circuitos en estado estacionario de corriente continua y alterna y el régimen transitorio de continua. El primer módulo se completa con el estudio de la propagación de energía por medio de ondas mecánicas. La imposibilidad de explicar de qué manera nos llega la energía del Sol, fuente de toda la energía disponible en nuestro planeta, es el disparador de los temas del segundo módulo donde cada clase, tratada desde el punto de vista de la teoría de campo, se relaciona con temas del primer módulo imprimiendo a la cursada la característica integradora mencionada.

## RESULTADOS

La metodología propuesta fue probada en las cursadas por promoción para las carreras de Ingeniería en Construcciones, Civil e Hidráulica (2013) y para Ingeniería Electromecánica, Eléctrica y Electrónica (2014-2015). La comparación con cursos dictados por el mismo profesor en la modalidad tradicional durante los años 2009 a 2012, permitió comprobar una disminución del orden de 10% en el porcentaje de alumnos que habiéndose anotado al curso, asistieron al menos un par de clases sin llegar a rendir (figura 1). En figura 2 se puede observar que también disminuyó el porcentaje de alumnos que abandonaron sin utilizar todas las posibilidades. En figura 3 se puede comprobar un aumento del 16% en el promedio de promocionados con respecto a la modalidad tradicional.

La figura 4 puede tomarse como un indicador de la efectividad del método probado ya que por cada alumno que promocionó, en la modalidad tradicional abandonaron dos mientras que en el método propuesto solamente lo hizo uno. Se debe mencionar que no se tuvieron en cuenta los alumnos desaprobados ni los que aprobaron la cursada con la posibilidad de rendir examen final que constituyen aproximadamente el 10% de los inscriptos repartidos de manera similar y que se presentaron de igual forma para ambas modalidades (figura 5).



## CONCLUSIONES

La presentada es una de las formas posibles a tener en cuenta en la implementación de un nuevo plan para las carreras de ingeniería. No es la única ni la mejor, pero trata de incluir a la mayor cantidad de alumnos teniendo siempre presente el significado de la palabra Ingeniero.

Se demuestra que con una propuesta metodológica diferente, respecto de la forma tradicional de impartir clases de Física, se obtienen mejoras. Estas podrán ser

significativamente mayores en tanto se comiencen a consensuar nuevos métodos de enseñanza.

De los datos investigados y obtenidos globalmente es preocupante el porcentaje de alumnos retenidos, que redundará en menores posibilidades de salida laboral al egreso.

Una posible solución sería una misma carrera ofrezca títulos intermedios. Así, algunas materias podrían desdoblarse de manera similar a la mostrada en este trabajo. Una parte, dedicada a los temas afines a todas las carreras y otra, más especializada, donde se tratarían los temas necesarios para alcanzar el nivel de excelencia pretendido.

La primera, común a todos, permitiría acceder a los títulos intermedios a medida que el alumno avanza en su carrera. La segunda, optativa, le permitirá acceder a puestos de vanguardia si le interesa y posee capacidad intelectual para lograrlo.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. Girelli, Marina; Dima, Gilda (2011). Enseñanza por competencias en la universidad: Un ejemplo del electromagnetismo básico. *Lat. Am. J. Phys. Educ.* Vol. 5, No. 2, June 2011
2. Meneses Villagrà, J. A.' y Caballero Sahelices, M.c (1995) Secuencia de enseñanza sobre el electromagnetismo. *Enseñanza de las ciencias*, (1), 36-45.
3. Moreno Olivos, Tiburcio, (2011). Didáctica de la Educación Superior: nuevos desafíos en el siglo XXI. *Perspectiva Educacional*, Vol.50.nº2, Pp.26-54
4. Solbes, Jordi, Montserrat, Rosa y Furió, Carles (2007). El desinterés del alumnado hacia el aprendizaje de la ciencia: implicaciones en su enseñanza. *DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES Y SOCIALES*. N.º 21, 91-117 (ISSN 0214-4379)



# HIDRÁULICA



## PLANTA PILOTO PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUA: PRUEBA DE CAMPO

Eliana Berardozi<sup>(1-2)</sup>, Gabriela Ortigoza<sup>(1)</sup>, Fernando S. García Einschlag<sup>(2)</sup> y Cecilia Lucino<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Dpto. Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNLP. Calle 47 N°200, CP (1900), La Plata, Argentina.

<sup>(2)</sup> Instituto de Investigaciones Físicoquímica Teóricas y Aplicadas (INIFTA), Dpto. de Química, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP. Calle 64 Diag. 113, CP (1900), La Plata, Argentina.  
eliana.berardozi@gmail.com

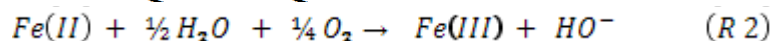
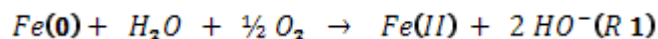
### INTRODUCCIÓN

El arsénico (As) es uno de los elementos que por su elevada toxicidad, ejerce una significativa limitación sobre la potabilidad del agua. Elevadas concentraciones (>10 µg/l, límite OMS) afectan a 140 millones de personas en 70 países a lo largo del mundo (Ravenscroft et al. 2009). La llanura Chaco-Pampeana es una región reconocida a nivel mundial por su alto contenido de As en agua subterránea, donde el área involucrada abarca 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> de nuestro país afectando a 4 millones de habitantes (Bundschuh et al. 2004; Bhattacharya et al. 2006). En la Provincia de Buenos Aires un 87 % del territorio se ve afectado, y se han identificado zonas con niveles de As >100 µg/l, principalmente en las zonas sur y noroeste (Auge et al. 2005).

La ingesta prolongada de agua con tenores elevados de As causa daños al organismo, dando lugar a una enfermedad conocida como hidroarsenicismo crónico regional endémico (HACRE). Produce cáncer de riñón, hígado, pulmón entre otros, además de otros efectos. Se acumula en huesos, músculos y piel. Se fija en pelos y uñas produciendo hipo/hiper pigmentación, queratosis y cáncer de piel. Por ello, es fundamental buscar soluciones técnicas eficaces y de bajo costo para poder obtener agua libre arsénico y dar una respuesta a este problema.

El objetivo del presente trabajo fue verificar el funcionamiento de un prototipo desarrollado en la UNLP mediante pruebas de campo, empleando una fuente natural de agua subterránea. Analizar las dificultades operativas encontradas por los usuarios y proponer alternativas de diseño para el mejoramiento del prototipo desarrollado.

El prototipo desarrollado se basa en el empleo de la técnica "Hierro Cero-Valente" (ZVI), que opera de manera continua para obtener hasta 1000 l/día de agua libre de arsénico. La técnica empleada (ZVI) involucra procesos de adsorción y/o co-precipitación de contaminantes sobre especies oxidadas de hierro metálico. En presencia de oxígeno el hierro metálico es oxidado a Fe(II) a través de la reacción R1. Posteriormente el Fe(II) es oxidado a especies de Fe(III) mediante la reacción R2. En estas condiciones las especies férricas producidas generan fases coloidales capaces de remover el As:



Las pruebas de campo fueron realizadas en la Cooperativa de provisión de aguas de Castelli perteneciente a FEDECOBA (Federación de Cooperativas de Electricidad y Servicios de la Provincia de Buenos Aires Limitada), quienes se vieron interesados en probar esta nueva tecnología.

### PARTE EXPERIMENTAL

#### Materiales y metodología

Los ensayos fueron realizados utilizando un prototipo continuo, diseñado para tratar



caudales de hasta 1000 litros por día de agua. El mismo cuenta con un reactor tubular a escala piloto de 6800 ml relleno con lana de acero comercial (Mapavirulana ®) como primera etapa, un segundo módulo de aireación/contacto/pre-filtrado y un tercer módulo para la filtración de sólidos. El caudal a tratar ingresa al sistema por gravedad desde un tanque elevado, pasando por un sistema de corrección automática de pH mediante una bomba dosificadora de HCl previo al ingreso del agua al reactor. En el primer diseño, los 3 módulos se ubicaron sobre una misma base de apoyo cubiertos por una carcasa tal como se muestra en la Figura 1. Luego de la primera prueba, se realizaron modificaciones al sistema con el objeto de mejorar sus prestaciones y facilitar su operación. El prototipo modificado, empleado durante la segunda prueba, se muestra en la Figura 2.

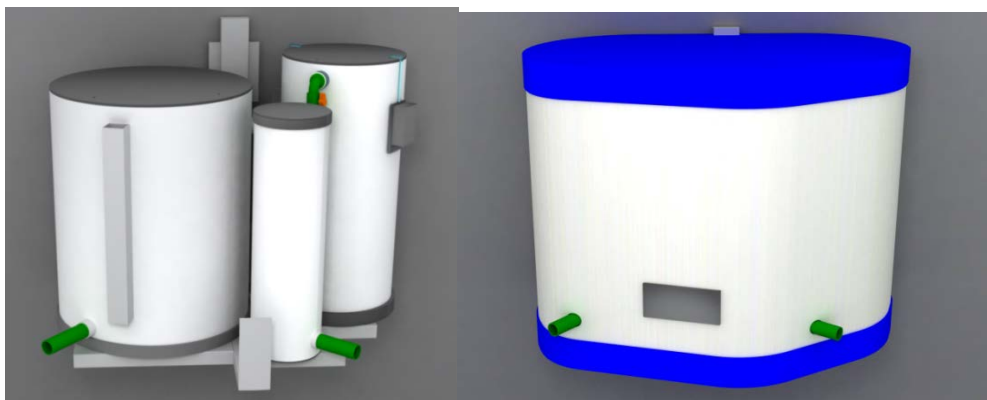


Figura 1. Esquema de la estructura interna del prototipo y vista exterior.



Figura 2. Esquema y foto del segundo prototipo utilizado.

Se trabajó con agua proveniente de un pozo fuera de uso por su alto contenido de As (~130 ppb). Diariamente se trasladó agua de este pozo para operar la planta de manera continua de lunes a viernes con un caudal de 700 l/día. Previo a la realización de las pruebas, se realizó un muestreo del pozo para la realización de análisis fisicoquímico del agua a tratar.

Se realizó un monitoreo diario del caudal por parte de los operadores quienes, tres veces por semana, determinaron el contenido de As en campo y tomaron muestras de agua tratada para su posterior análisis en el laboratorio de la Facultad (donde se determinaron los niveles de As, Fe(II), Fe(III) y Fe total). Eventualmente también se realizaron muestreos para un análisis fisicoquímico completo del agua tratada por parte de un laboratorio externo.

Las concentraciones de Fe(III) y Fe(II) se cuantificaron espectrofotométricamente, a través de los complejos formados con KSCN y o-fenantrolina, respectivamente. La absorbancia del complejo de color formado con KSCN se registró a 525 nm y la del complejo formado con o-fenantrolina a 510 nm. La determinación de arsénico en las muestras de

agua se realizó empleando el método de dietilditiocarbamato de plata (AgDDTC). Los parámetros analizados y las técnicas mediante las cuales fueron realizadas las caracterizaciones fisicoquímicas completas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos determinados y técnicas utilizadas.

PARÁMETRO	MÉTODO	PARÁMETRO	MÉTODO
pH	SM M 4500 H - B - Potenciométrico	Sulfatos	SM M 4500 SO4 -E - Turbidimétrico
Conductividad	SM M 2510 B	Nitratos	SM M 4500 NO3- -E Espectrofotometría UV Vis
Turbiedad	SM M 2130 B - Nefelométrico	Nitritos	SM M 4500- NO2- -B Espectrofotometría UV Vis
Color	SM M 2120 B modificado	Fluoruros	SM M 4500 F -D - Espectrofotométrico
Olor	SM 2150 - B - Organoléptico	Arsénico	EPA SW 846 M 7061A - EAA Generación de hidruros
Aspecto	SM 2110	Amonio	SM M 4500 NH3 -C - Espectrofotométrico
Sólidos totales disueltos	SM M 2540 C - Gravimétrico	Hierro Total	SM M 3500 Fe - EAA
Dureza	SM M 2340 C - Titulométrico EDTA	Manganeso	SM M 3111 Mn - EAA
Alcalinidad Total	SM M 2320 B - Titulométrico	Fosfatos	SM 4500 P -21 st Ed
Cloruros	SM M 4500 Cl - B - Titulométrico		

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Primera prueba

Durante la primera prueba se detectaron algunos inconvenientes que en conjunto fueron solucionados y registrados para luego realizar las modificaciones necesarias. El acceso restringido al prototipo por la parte superior, originado por la carcasa, dificultó la limpieza del filtro. Además, la demanda de limpieza en las primeras semanas fue mayor a la esperada, problema originado por exceso de ácido durante los primeros días de operación, el cual fue rápidamente corregido regulando adecuadamente el sistema de control de pH.

Los resultados obtenidos durante la primera prueba mostraron que, pese a los problemas detectados, se pudo remover el arsénico del agua de pozo con una concentración de 0.132 ppm a un valor por debajo de 0.01 ppm, durante aproximadamente 17 días con un caudal de 700 l/día de agua. Esto resultó muy positivo considerando que se trataba de la primera prueba realizada con agua real y operando la planta con personal no especializado en la técnica de remoción.

Con respecto al contenido de hierro total en el agua tratada, durante los primeros 15 días se detectaron concentraciones por encima del límite permitido de 0.3 ppm a causa del exceso de ácido suministrado al sistema. Luego de regulada esta situación el contenido de este metal disminuye por debajo de 0.1 ppm.

### Segunda prueba

A partir de las observaciones realizadas durante la primera prueba se incorporaron modificaciones al prototipo y se realizó una nueva prueba de aproximadamente dos meses de duración, con un cambio del relleno de ZVI en la columna luego de transcurrido el primer mes. Las principales modificaciones realizadas fueron: i- la incorporación de un mezclador estático en línea luego de la inyección de ácido para disminuir su consumo; ii- el cambio del filtro por uno de mayor diámetro y altura para aumentar su tiempo de operación; e iii- la eliminación de la carcasa para facilitar el acceso a los módulos y la limpieza del equipo.

Los resultados de la segunda prueba muestran porcentajes de remoción del orden del 95-100 % durante dos períodos de 28 días. Los análisis externos también verificaron la eficiencia del proceso al obtener concentraciones de As por debajo del límite de detección para las dos muestras de agua tratada llevadas a analizar (Tabla 2). Con respecto al resto de los valores analizados, se puede observar que no se produjeron alteraciones en otros parámetros de calidad del agua a lo largo del tratamiento. En especial se verifica que el contenido de hierro se encuentra por debajo del límite máximo admisible.

Tabla 2. Resultados análisis fisicoquímico en muestras de agua sin tratar y tratadas durante la segunda prueba.

Parámetros	Sin tratar 15/5/15	Tratada 11/5/15	Sin tratar 28/12/15	Tratada 28/12/15	Limite CAA*	Unidad	LD**
pH	8.0	6.96	8.5		6.5 - 8.5	U de pH	0,1
Conductividad	793		821	945	-	µmhos/cm	1
Turbiedad	<3	<3	<3	<3	<3	NTU	3
Color	<3	<3	<3	<3	<5	U de Color	3
Olor	Inodoro	Inodoro			Inodoro	-	-
Sólidos totales disueltos		585	522	552	1500	mg/l	1
Dureza	144	134	139	137	400	mg de CaCO <sub>3</sub> /L	1
Alcalinidad Total	372	-	382	249	-	mg de CaCO <sub>3</sub> /L	1
Cloruros	22	126	24	138	350	mg/L	1
Sulfatos	16	20	17	20	400	mg/L	1
Nitratos	13.9	14.4	14.9	11.5	45	mg/L	0,5
Nitritos	0.013	0.099	0.014	<0.005	0.1	mg/L	0,005
Fluoruros	1.08	1.25	1.34	1.32		mg/L	0,03
Arsénico	<b>0.132</b>	<b>&lt;0.003</b>	<b>0.115</b>	<b>&lt;0.003</b>	<b>0.01</b>	mg/L	0.003
Amonio	<0,1	0.2	0.1	0.1	0.2	mg/L	0,1
Hierro Total		<b>0.112</b>	<b>0.024</b>	<b>0.042</b>	<b>0.3</b>	mg/L	0.006
Manganeso		0.238	<0.006	0.012	0.1	mg/L	0.006
Fosfatos			0.43	<0.01	-	mg/L	0.01

\*Límite establecido por el Código Alimentario Argentino\*\* Límite de detección de la técnica

Con respecto a la operación del prototipo, como se esperaba, al aumentar el área de filtración no sólo disminuyeron las tareas de limpieza necesarias sino también el resto de actividades de mantenimiento.

### Análisis curvas de ruptura

El comportamiento de sistemas de flujo continuo a través de un lecho fijo puede caracterizarse en términos de curvas de ruptura, obtenidas por el trazado de los valores de  $C/C_0$  en la salida de las columnas en función del tiempo de tratamiento. Estas curvas suelen mostrar un perfil en forma de S, y para un contaminante determinado, los parámetros que la definen dependen tanto de las propiedades del lecho, así como de las condiciones de operación (Einschlag & Triszcz 2008). En la Figura 3 se muestra la curva de ruptura construida a partir de los datos de concentración de arsénico a la salida de la columna para una concentración de entrada de 132 ppb ( $C_0$ ).

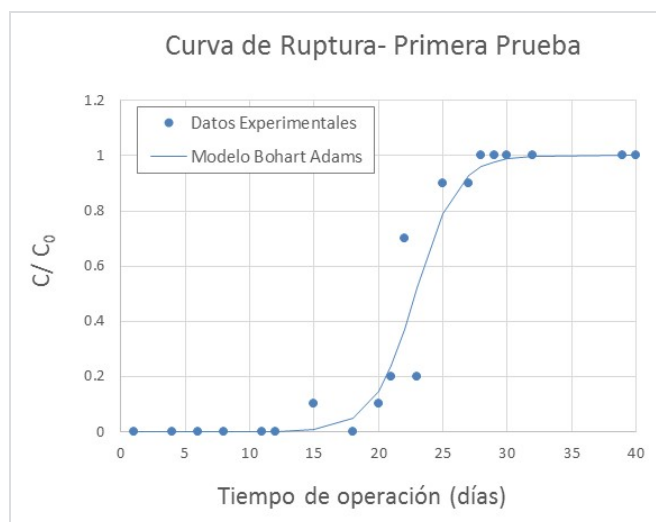


Figura 3. Curva de ruptura correspondiente a la primera prueba.

Los valores experimentales de la curva de ruptura fueron ajustados utilizando el modelo de Bohart-Adams (Ec. 1).

$$\frac{\bar{C}}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{k_{ab}N_0Z}{v_{filt}} - k_{ab}C_0 t\right)} \quad (\text{Ec. 1})$$

A partir del conocimiento de las condiciones utilizadas para el ensayo: concentración de contaminante en la entrada ( $C_0$ ), velocidad de filtración ( $v_{filt}$ ) y largo del lecho ( $Z$ ), el modelo simplificado de Bohart-Adams permite caracterizar el sistema estudiado mediante la estimación de sólo dos parámetros: i- la capacidad de la columna ( $N_0$ ), y ii- la constante cinética del lecho ( $k_{ab}$ ). En la Tabla 5 se muestran las condiciones operativas empleadas y los resultados del ajuste de los datos obtenidos durante el primer ensayo de campo.

Tabla 5. Resultados del ajuste de la primera curva de ruptura mediante el Modelo de Bohart Adams.

Datos		Parámetros calculados	
Altura de lecho (Z)	45 cm		
Conc. de As a la entrada ( $C_0$ )	0.1 mg/l		
Masa de ZVI	500 gr	Máx. capacidad del lecho ( $N_0$ )	170 mg/l
Velocidad de filtración ( $v_{filt}$ )	140 cm/h	Cte. Cinética del lecho ( $k_{ab}$ )	$0.258 \text{ (mg/l)}^{-1}\text{h}^{-1}$

Hay que destacar que el modelo de Bohart-Adams es un modelo simple que se aplica a lechos en los que la retención del contaminante se produce por adsorción sobre un lecho químicamente inerte. En el caso de los sistemas basados en el empleo de ZVI no solo intervienen mecanismos adsortivos y el lecho fijo va modificándose con el tiempo de servicio debido a la acumulación de productos de corrosión sobre la superficie de ZVI. Por este motivo, los parámetros estimados empleando la ecuación 1 sirven como una primera aproximación para la caracterización del sistema y son utilizados solo para comparar resultados de pruebas realizadas con el mismo tipo de sistema.

A partir de las curvas de rupturas es posible también, determinar los tiempos de servicio para cada prueba, definido como el tiempo de operación por encima del cual la concentración del contaminante supera el máximo admisible. En la Figura 4 se pueden observar los tiempos de servicio correspondientes a las dos pruebas realizadas. La primera curva de ruptura obtenida muestra un tiempo de servicio cercano de 19 días mientras la segunda alcanza los 27 días. Para mayores tiempos de servicio, el contenido de As en los

efluentes medidos en cada prueba superaron el límite permitido por la OMS ( $Cr=0.01$  mg/l, concentración de ruptura, ver línea roja Figura 4).

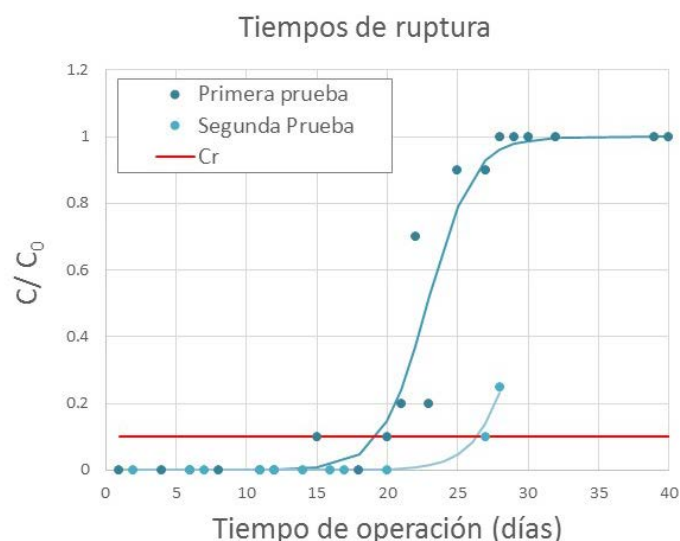


Figura 4. Tiempos de ruptura para las dos pruebas de campo realizadas.

Estudios previos realizados en nuestro laboratorio han mostrado que para tiempos de operación por encima del tiempo de ruptura, las concentraciones de  $Fe(II)_{Filt}$  a la salida del primer módulo son siempre menores a 0.5 ppm. En este contexto cabe destacar que la alta tasa de consumo de ácido registrada durante el primer período de la primera prueba provocó una velocidad de corrosión mayor a la requerida, por este motivo la producción de  $Fe(II)_{Filt}$  por parte del primer lecho se interrumpió uno días antes de lo previsto y el tiempo de servicio en la primera prueba fue menor.

## CONCLUSIÓN

Las dos pruebas realizadas arrojaron resultados satisfactorios desde el punto de vista técnico, ya que permitieron verificar, utilizando una matriz de agua natural, que el diseño básico y la técnica empleada son eficaces para remover contenidos de arsénico del orden de 100 a 150 ppb presentes en aguas subterráneas en diversas regiones de la provincia de Buenos Aires.

La participación activa del personal de la cooperativa de Castelli resultó altamente productiva y el intercambio de información ha permitido solucionar varios inconvenientes que surgieron de la operación diaria del prototipo. Esto ha posibilitado realizar mejoras sustanciales al diseño y lograr un diseño más robusto y sencillo de operar.

Dado que los resultados obtenidos han sido muy alentadores, se ha previsto la posibilidad de realizar una nueva prueba de campo con un prototipo de mayor envergadura capaz de alcanzar caudales de tratamiento del orden de los 4 m<sup>3</sup> diarios.

## BIBLIOGRAFÍA

- Auge, M., Espinosa, G. & Sierra, L., 2005. Arsénico en el agua subterránea de la Provincia de Buenos Aires.
- Bhattacharya, P. et al., 2006. Distribution and mobility of arsenic in the Rio Dulce alluvial aquifers in Santiago del Estero Province, Argentina. *Science of the Total Environment*, 358, pp.97–120.
- Bundschuh, J. et al., 2004. Groundwater arsenic in the Chaco-Pampean Plain, Argentina: case study from Robles county, Santiago del Estero Province. , 19, pp.231–243.
- Einschlag, F.S.G. & Triszcz, J.M., 2008. ARSENIC REMOVAL IN CONTINUOUS SYSTEMS USING ZERO - VALENT IRON FIXED BEDS. In *Arsenic: Sources, Toxicity and Environmental Impact*. p. Chapter 16.
- Ravenscroft, P., Brammer, H. & Richards, K., 2009. Arsenic Pollution: A Global Synthesis. *John-Wiley & Sons, Oxford*.

## APLICACIÓN DEL MODELO SWMM PARA EL DIAGNÓSTICO DE UN SISTEMA PLUVIAL URBANO SINGULAR EN UNA LOCALIDAD DEL NOROESTE BONAERENSE

Angheben, Enrique<sup>1</sup>; Romanazzi, Pablo<sup>1</sup>; Calvetty Ramos, Gabriela<sup>1</sup>; Bonardo, Leandro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Integrantes de la UIDET Hidrología – Dto. Hidráulica, FI-UNLP

<sup>2</sup> Becario de la UIDET Hidrología – Dto. Hidráulica, FI-UNLP

UIDET Hidrología - Departamento de Hidráulica - Facultad de Ingeniería - UNLP  
Calle 47 N° 200, piso 1, Oficina 6, La Plata - Tel. 0221-427-5223  
eangheben@hotmail.com

**Palabras Clave:** Inundación, SWMM, Reservorios, 30 de Agosto

### INTRODUCCIÓN

La localidad de 30 de Agosto se ubica a 40 km de la ciudad de Trenque Lauquen, al Oeste de la provincia de Buenos Aires, en el partido del mismo nombre. Cuenta con alrededor de cinco mil habitantes, y su economía se basa principalmente en la agricultura y la producción de tambos lecheros.

Desde hace décadas la zona Oeste de la provincia sufre inundaciones que afectan no sólo a áreas productivas, sino también a importantes centros urbanos y pequeñas localidades que sobrellevan de igual manera sus consecuencias.

La situación se ve aún más comprometida por la geomorfología regional, esto es, una zona de dunas separadas por bajos (interdunas), de carácter arréica, sin cursos naturales predominantes que encaucen los escurrimientos superficiales, determinado la importancia de la evapotranspiración y la infiltración como balance de las precipitaciones.

En particular esta comuna ha sufrido en los últimos años importantes inundaciones de su casco urbano, como consecuencia de precipitaciones de corta duración y variada intensidad, llegando incluso a niveles que causaron el ingreso del agua a las viviendas. Este es el caso del evento del 2 y 3 de febrero de 2015, de 280 mm lluvia precipitada en 24 horas.

Fue precisamente la inundación provocada por esa precipitación la que derivó en la encomienda por parte de la Municipalidad de Trenque Lauquen a la UIDET Hidrología de un “Estudio Hidrológico – Hidráulico de la Localidad de 30 de Agosto”. El presente trabajo se llevó adelante en el marco de ese Estudio, en el cual el becario desarrolló el modelo hidrodinámico, realizó la carga de datos planialtimétricos e hidrológicos, y efectuó las diferentes corridas de diagnóstico y verificación de las obras propuestas.

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### Trabajos de Campo

Antes de dar inicio al estudio, y durante su realización, se requirió efectuar trabajos de campo. Se efectuaron tres visitas a la localidad con diferentes objetivos. Las dos primeras se focalizaron en el reconocimiento físico del medio, la identificación del sistema de desagües pluviales (reservorios, estaciones de bombeo, conducciones, puntos de vuelco, etc.), tomar contacto con autoridades y vecinos, y el intercambio de documentación gráfica digital, planialtimétrica y estadística presente en instituciones locales. La tercera, se destinó a un relevamiento topográfico expeditivo de puntos claves que interesaban al funcionamiento y calibración del modelo, además de la toma del nivel freático en el pozo testigo ubicado en la Escuela de Educación Secundaria Agraria N° 1 (EESA N° 1), “Manuel



Belgrano” de 30 de Agosto. El relevamiento se realizó con un equipo GPS geodésico TopCon GR3.

En la Figura N° 1 se muestran, sobre una imagen satelital de 30 de Agosto, los puntos más relevantes de su sistema de desagües pluviales, coincidentes con los puntos donde se complementó el relevamiento existente con cotas definidas para el modelo (napa freática, nivel en reservorios, arranque y parada de bombas, etc.).

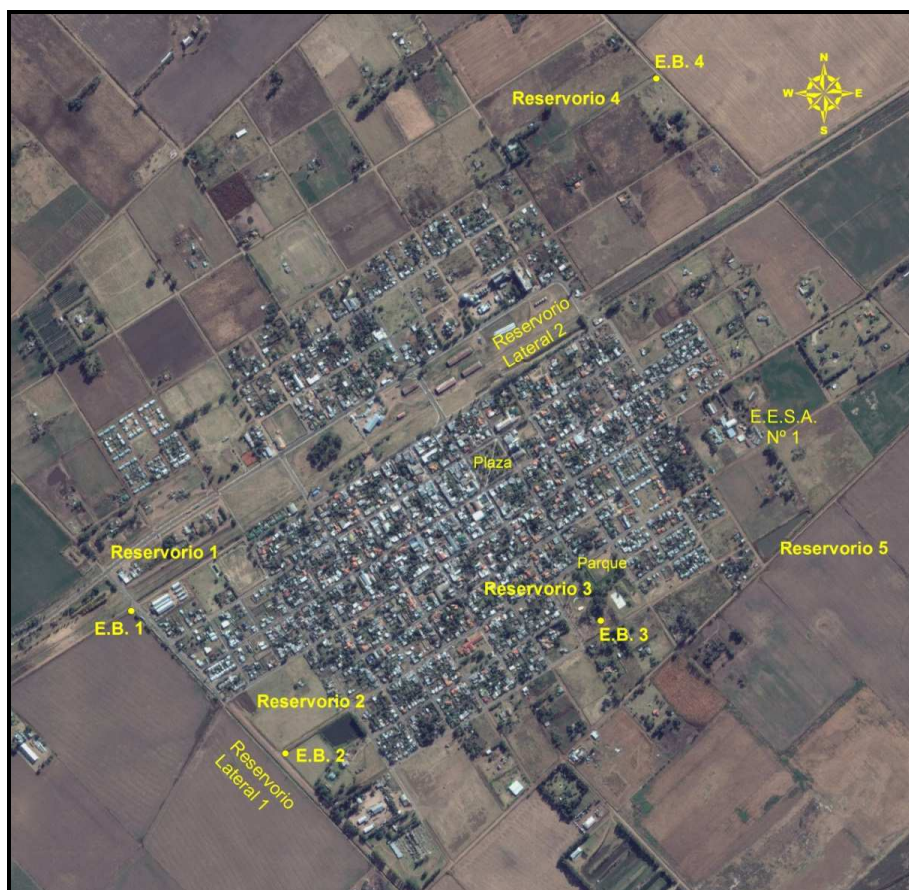


Figura N° 1: Relevamiento de los puntos más importantes de la localidad.

## Estudio Hidrológico

El trabajo de gabinete consistió primeramente en la recopilación de antecedentes de base en diferentes instituciones, entre las cuales se destacan los registros de precipitaciones diarias de la estación Trenque Lauquen del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), las cartas en escala 1:50.000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN), imágenes SRTM y el amanzanamiento del ejido urbano, en formato Shape (SIG). En forma complementaria a los trabajos de campo, y con los antecedentes recopilados se realizó un estudio estadístico de precipitaciones y de niveles freáticos de la localidad.

En particular, los resultados del estudio de precipitaciones, elaborado a partir de los datos obtenidos de la EESA N°1 y el Servicio Meteorológico Nacional, se presentan en el trabajo *“Importancia del registro local de datos meteorológicos. Estudio de caso, escuela agraria de 30 de Agosto, Pcia. de Buenos Aires”*, presentado para estas mismas Jornadas. Como resultado relevante de dicho estudio podemos mencionar que existe una buena correlación entre las series de precipitaciones de Trenque Lauquen y 30 de Agosto, constatándose en general valores superiores de la primera respecto de la segunda. La recurrencia o período de retorno del evento de Febrero de 2015 supera, en todos los casos, los 30 años.

Como método de estimación de las curvas Intensidades – Duración – Recurrencia (IDR), se utilizó el método de Regionalización de las Lluvias Intensas en Argentina, propuesto en el Manual para el “Diseño de Planes Maestros para la Mejora de la Infraestructura y la Gestión del Drenaje Urbano”, de la Dirección Provincial de Obras Hidráulicas (DPOH, ex DiPSOH).

### Modelación Matemática

El modelo matemático utilizado fue el Storm Water Management Model” (SWMM) de la “United States Environmental Protection Agency” (EPA), del tipo hidrológico-hidrodinámico, de licencia libre y gratuita, y de amplio uso en este tipo de estudios. El modelo permite la simulación de los procesos de transformación lluvia – caudal y su traslado a lo largo de la red de desagües, tanto por calles como por conductos simultáneamente. Posee dos módulos principales, uno de escorrentía y otro de transporte.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como sucede en general en toda trama urbana, una parte del excedente pluvial escurre a superficie libre por calles y zanjas, y otra, lo hace por una red de conductos de diámetros y/o secciones variables. Pero en el caso analizado, también existen, y forman parte del sistema pluvial, varios reservorios que acumulan y retardan los picos de caudal, así como también varias estaciones de bombeo que impulsan esos volúmenes acumulados a canales a cielo abierto sin revestir, los cuales finalmente conducen esos excedentes hacia fuera de la planta urbana del pueblo. En particular para las aproximadamente 272 hectáreas que conforman el ejido urbano de 30 de Agosto, existen cinco reservorios, cuatro estaciones de bombeo, y el entramado de una red de cuatro conducciones pluviales que, partiendo desde una misma esquina, transportan esos excedentes hacia dos diferentes puntos de descarga.

Se suma a la dificultad anterior, el contexto regional de muy baja pendiente donde se ubica la localidad, esto es, el noroeste bonaerense, la cual se verifica en la propia altimetría de su planta urbana, de cota casi invariante en el orden de 100m IGN y pendiente 0,3 por mil, causando que tanto los escurrimientos superficiales como por conductos, sean poco eficientes.

De la aplicación de la metodología propuesta en el Manual de la DPOH, se obtuvieron las relaciones I-D-R que se muestran en la siguiente Figura N° 2.

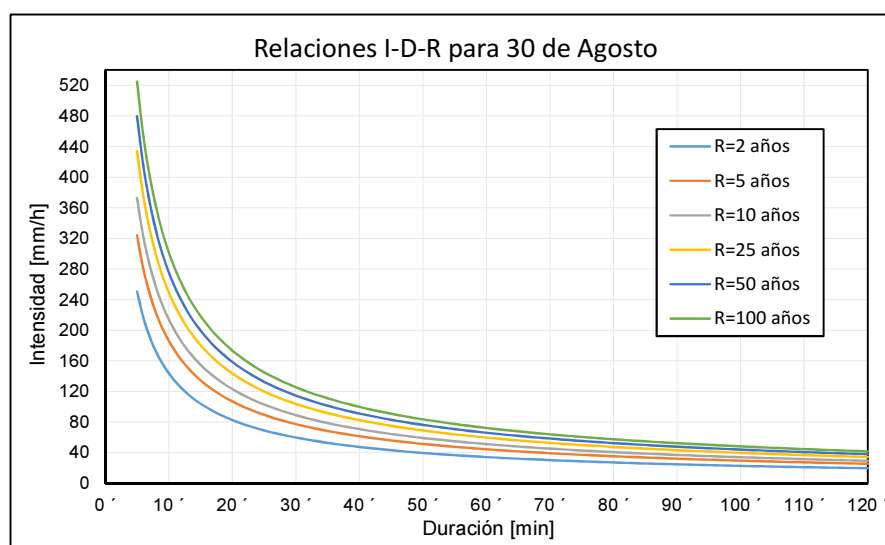


Figura N° 2: Curvas I-D-R para 30 de Agosto

Habiéndose estimado el tiempo de concentración de la mayor cuenca en el orden de una hora, aplicando el método de Bloques Alternos con intervalos de 5 minutos y para

recurrencias de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años; se generaron hietogramas de proyecto, de una duración igual al doble del tiempo de concentración, con el pico de intensidad coincidiendo con dicho tiempo.

El armado del modelado comenzó incorporando el trazado urbano mediante nodos y conducciones, que representaban esquinas, calles y conductos pluviales respectivamente. Posteriormente se añadieron los reservorios y estaciones de bombeo, y finalmente se cargaron las lluvias de diseño que alimentan el módulo hidrológico.

En la Figura N° 3 se muestra una vista general de cómo interpreta el modelo a la planta urbana de 30 de Agosto. Las áreas en gris corresponden a las cuencas de aporte pluvial que desaguan a cada esquina, representadas en el modelo como un nodo de cálculo, y las calles y conductos como las líneas (links) que unen esos nodos.

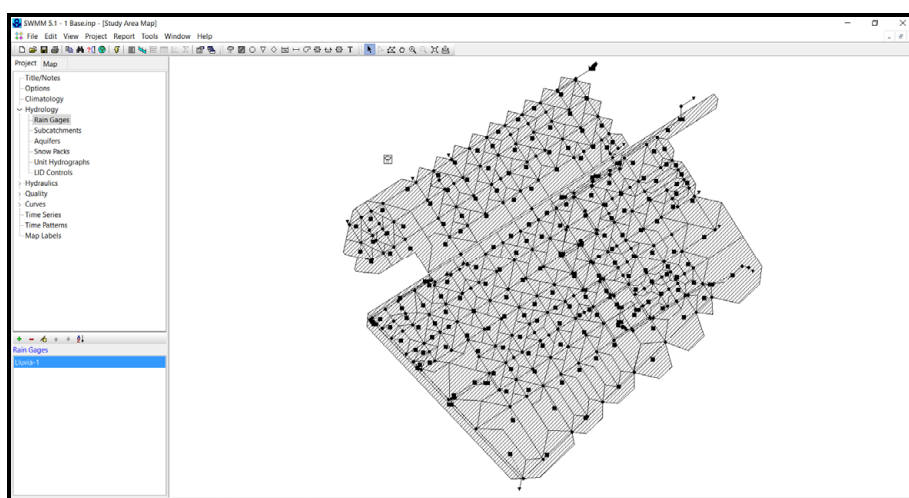


Figura N° 3: Planta urbana de 30 de Agosto según el modelo SWMM.

Dentro de las potencialidades del modelo SWMM, se encuentra la posibilidad de, una vez puesto a correr con las diferentes tormentas de diseño, observar lo que sucede en cada nodo y/o calle (por ejemplo altura de agua en calles y veredas) mediante la representación en una escala de colores, que ayuda a la interpretación. Una vista de dicha representación se muestra en la Figura N° 4.

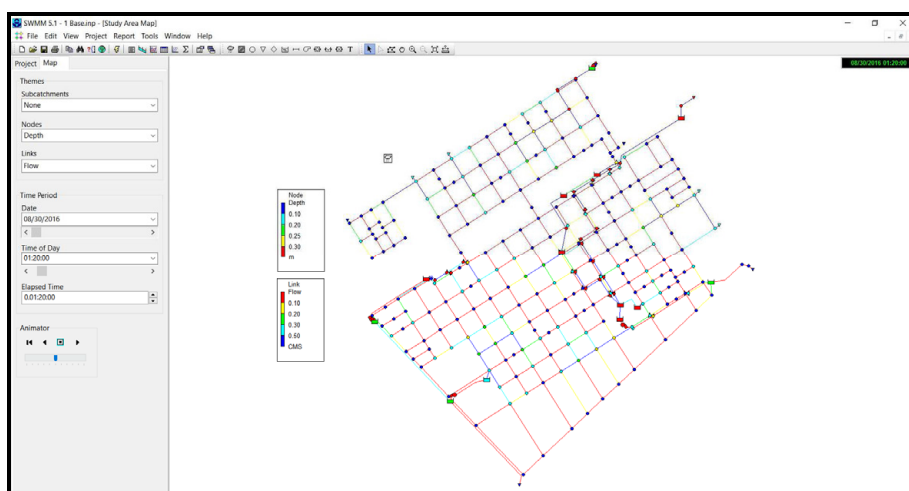


Figura N° 4: Planta urbana con niveles de agua en calles y esquinas según el modelo SWMM.

Con la modelización se pudo establecer un diagnóstico del funcionamiento actual del sistema pluvial y evaluar posibles soluciones a tomar en cuenta. Para ello se trabajó principalmente con escenarios de lluvias de 2 y 5 años de recurrencia, compatibles con lo

requerido por la normativa para los proyectos de desagües pluviales, y tres posibles escenarios con intervención futura, como ser, la ampliación de los reservorios, la ejecución de nuevas conducciones y finalmente una que contempla ambas posibilidades.

Respecto a las estaciones de bombeo existentes no se ha previsto la modificación de su actual configuración, dado que su principal función es el vaciado de los reservorios en un tiempo razonable, y su participación en la evacuación de los picos de caudal es muy menor.

A modo de ejemplo de los resultados obtenidos en la modelación de los reservorios, en la siguiente Tabla N° 1 se comparan los volúmenes actuales con los mínimos necesarios para amortiguar una lluvia de 2 años de recurrencia.

Tabla N° 1: Evaluación de la capacidad de los reservorios de la localidad.

Reservorio	Altura Disponible [m]	Volumen Actual [m <sup>3</sup> ]	Volumen Mínimo Necesario [m <sup>3</sup> ]
Reservorio 1	1,57	3234,2	3.500
Reservorio 2	1,10	9790,0	10.000
Reservorio 3	1,49	3851,7	4.500
Reservorio 4	1,27	2892,1	3.500
Reservorio 5	2,18	4922,2	5.000

Igualmente, en la Figura N° 5 se comparan los tirantes en función del tiempo (para R= 5 años), en una de las esquinas más comprometidas, para diferentes escenarios de acciones correctivas.

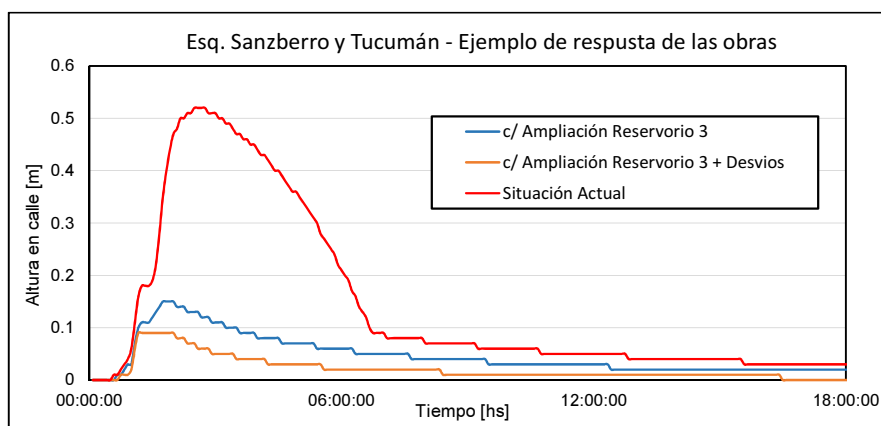


Figura N° 5: Ejemplo de visualización de la respuesta de las obras propuestas

El resultado de la modelación determino que en general el sistema de desagües pluviales de 30 de Agosto no es compatible con precipitaciones del orden de los 2 años de recurrencia, los problemas derivan tanto del déficit de volúmenes de almacenamiento como de la capacidad de las conducciones.

En lo que respecta a los reservorios se recomendó adoptar los volúmenes necesarios para una lluvia de 2 años de recurrencia, para valores mayores los volúmenes necesarios empiezan a ser condicionados por su ubicación en la planta urbana.

La escasa pendiente regional y en particular las características planialtimétricas de 30 de Agosto requieren tomar especial atención sobre el mantenimiento de un buen estado de conservación y limpieza de las conducciones y reservorios. Esa baja pendiente y el tipo de suelo (arenoso) provocan el embancamiento de los conductos, lo cual reduce su eficiencia, e incluso la puede anular.



Se recomendó buscar elevar el grado de protección del sistema de desagües pluviales, intentando llegar a los 5 años de recurrencia, grado aceptable para la localidad, implementado un plan de proyectos, obras y acciones que en forma paulatina tiendan a este objetivo.

Trabajar con un modelo georreferenciado, apoyado en imágenes satelitales, facilita la interpretación de las características de las cuencas y la carga de datos, pero sobre todo la extrapolación de los resultados a la planialtimetría urbana o modelo digital del terreno, para por ejemplo, la elaboración de mapas de inundación.

## CONCLUSIONES

El caso estudiado representa un ejemplo más respecto a que la aplicación de un modelo hidrodinámico del tipo SWMM es la herramienta adecuada para la correcta evaluación de este tipo de sistemas pluviales complejos, dada la variedad, tipo y funciones de los componentes hidráulicos presentes. El resultado de la modelación permitió formular recomendaciones pertinentes y útiles, para un mejor manejo de los desagües pluviales de la localidad de 30 de Agosto.

Sin embargo, también es un ejemplo de como una precipitación de período de retorno varias veces superior a los de diseño de los desagües pluviales, puede afectar a una localidad, cualquiera sea ésta, pero sí, como en este caso, nos referimos a una pequeña población, con mayor cercanía y afinidad entre vecinos, el impacto relativo es mayor.

Situación ésta que se ve agravada debido a que, en general, estas pequeñas localidades poseen menor capacidad de respuesta.

Esto requiere entonces tomar conciencia qué, más allá de las “dimensiones” de la planta urbana, es necesario contar siempre con un Plan Integral de manejo de los desagües pluviales, que tenga en cuenta la implementación de planes de alerta y contingencia. Así siendo éstos consensuados e implementados desde la autoridad municipal y conocidos por los vecinos, ayuden a llevar adelante situaciones conflictivas, de manera de minimizar las pérdidas materiales, pero sobre todo resguardar la vida de la población.

## BIBLIOGRAFÍA

- Brown, S., Stein, S. y Warner, J. (2001); “Urban Drainage design manual”, HEC-22.
- Dingman, S. L. (2002); “Physical Hydrology”; 2a Ed, Prentice Hall.
- Loague, K. (2010); “Rainfall – runoff modelling”; BPH4, IASH.
- Ministerio de Infraestructura de la Provincia de Buenos Aires (2011); “Manual para el diseño de Planes Maestros”; La Plata.
- Romanazzi, P. (2011); “Caracterización y tratamiento de la inundación urbana: el caso de la cuenca del arroyo del Gato en el partido de La Plata”; Laboratorio de Hidrología, Facultad de Ingeniería, UNLP; <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/26662>; La Plata.
- Romanazzi, P. (2014); “Evaluación del desagüe existente y proyectado con un modelo dual: cuenca arroyo del Gato, La Plata, Buenos Aires, Argentina”; II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Santa Fe, Argentina.
- Singh, V. P. (1988); “Hydrologic Systems, Vol. I, Rainfall-Runoff Modeling”, Prentice Hall.
- Singh, V. P. (1989); “Hydrologic Systems: Vol. II - Watershed Modeling”, Prentice Hall.
- Viessman, W. y Lewis, G. (2003), “Introduction to Hydrology”, 5a Ed., Prentice Hall.

## IMPORTANCIA DEL REGISTRO LOCAL DE DATOS METEOROLÓGICOS. ESTUDIO DE CASO, ESCUELA AGRARIA DE 30 DE AGOSTO, PCIA. DE BUENOS AIRES

Angheben, Enrique<sup>1</sup>; Bianchi, Guillermo<sup>1</sup>; Spadari, Germán<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Integrantes de la UIDET Hidrología – Dto. Hidráulica, FI-UNLP

<sup>2</sup> Alumno colaborador de la UIDET Hidrología – Dto. Hidráulica, FI-UNLP

UIDET Hidrología - Departamento de Hidráulica - Facultad de Ingeniería - UNLP  
Calle 47 N° 200, piso 1, Oficina 6, La Plata - Tel. 0221-427-5223  
eangheben@hotmail.com

**Palabras clave:** Precipitación, Escuela Agraria, Inundación, 30 de Agosto

### INTRODUCCION

Entre los días 2 y 3 de Febrero de 2015, la localidad de 30 de Agosto, perteneciente al partido de Trenque Lauquen, sufrió una de las inundaciones más importantes de su historia, como consecuencia de un evento de precipitación diaria del orden de los 280 mm, ubicándose en segundo lugar luego de la lluvia de 1987 (294 mm) que provocó la histórica inundación que afectó a toda la región, y en particular al partido de Trenque Lauquen (además de Carlos Casares, Pehuajó, 9 de julio y otros).

Sin embargo, la magnitud del evento hubiese quedado indocumentado de no ser por las mediciones sistemáticas que realiza la Escuela de Educación Secundaria Agraria N° 1 “Manuel Belgrano” (EESA N° 1), pública y de gestión estatal, de la misma localidad de 30 de Agosto. Esta escuela posee, entre otros instrumentos de medición de variables climáticas y agronómicas, un pluviómetro, que registra la precipitación diaria desde el año 1984 hasta la actualidad.

Este dato toma particular relevancia cuando se verifica que los registros de la Estación Meteorológica de Trenque Lauquen, perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y distante 40 km de 30 de Agosto, prácticamente no registraron precipitación en esos días (sólo recién el día 04/02/15), lo que confirma la gran variabilidad espacio temporal que presentan este tipo de sucesos.

El presente análisis se desarrolla en el marco del “Estudio Hidrológico – Hidráulico para la Localidad de 30 de Agosto, Partido de Trenque Lauquen” llevado adelante por la UIDET Hidrología para la Municipalidad de Trenque Lauquen.

El procesamiento estadístico de los datos obtenidos de la EESA N° 1 permitió asociar un período de retorno al evento, y establecer así su grado de severidad, dato muy importante en el marco del mencionado Estudio. Asimismo, se realizó un contraste con la serie de precipitaciones de Trenque Lauquen, de 105 años de longitud.

Cabe destacar que este estudio ha sido desarrollado por el alumno colaborador de la UIDET, como parte su Práctica Profesional Supervisada (PPS).

### MATERIALES Y MÉTODOS

Para el presente análisis se han utilizado dos series de precipitaciones, las cuales se describen a continuación:

- Registro de precipitaciones diarias de la estación meteorológica de la Escuela de Educación Secundaria Agraria N° 1 “Manuel Belgrano”, en el período 1984 – 2016.



Para el estudio se utiliza la serie hasta el año 2015 (último año completo al día de la fecha) cuya longitud de registro es entonces de 32 años. Es importante destacar el faltante de datos en cuatro meses del año 2003 (julio, agosto, septiembre, octubre), por la rotura del equipo de medición ocasionada por un rayo. De todas maneras, se decidió tomar como continua la serie ya que no origina grandes cambios en la misma al estar esos meses en período de bajas precipitaciones.

- Registro de precipitaciones diarias de la serie Trenque Lauquen, la cual proviene de datos obtenidos por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), y cuenta con una longitud continua de 105 años (1911-2015). Estos datos fueron adoptados por el Plan Maestro del río Salado (PMI) y provienen de elaboraciones rigurosas, en cuanto a chequeo de consistencia y completamiento de faltantes (ambos en base a datos de estaciones cercanas). La misma fue utilizada y verificada por la UIDET Hidrología y por consultoras privadas.

Se cuenta entonces con información propia y cercana (40 km) a la localidad de 30 de Agosto, con registros que se comparten en el mismo período.

### Análisis de valores extremos

Para este análisis se utilizaron precipitaciones máximas diarias anuales de ambas estaciones, se tiene así una serie con valores de 105 años y otra de 32 años para Trenque Lauquen y 30 de Agosto respectivamente. Asimismo se utilizaron dos de las distribuciones más conocidas en hidrología, estos es, la Distribución de Gumbel y la de Pearson III.

La distribución de Gumbel utiliza dos parámetros, la media y el desvío estándar, y la Pearson III, además de los anteriores incorpora también el coeficiente de asimetría. Los valores obtenidos para cada una de las series se muestran en la Tabla N° 1 siguiente.

Tabla N° 1: Parámetros de las series

Parámetro	Serie Trenque Lauquen	Serie EESA N° 1
Precipitación Promedio	119,8 mm	89,4 mm
Desvío estándar (S)	68,65 mm	58,31 mm
Coeficiente de Asimetría (Cs)	2,86 mm	2,65 mm

El intervalo de confianza establecido para ambas distribuciones fue del 95% y recurrencias comprendidas entre 1,01 y 1.000 años, de manera de obtener gráficos apropiados.

### Test de Bondad de Chi-Cuadrado

Para evaluar en forma analítica cuál distribución ajusta mejor a la muestra, se realizó una comparación entre los valores teóricos y muestrales de las funciones de frecuencia relativa, por medio del test de bondad de  $X^2$  (Chi-cuadrado).

Esta prueba consiste en comparar el valor de la variable  $X_c^2$  con el establecido como valor límite de la distribución  $X_{v,\alpha}^2$  ("α" es el nivel de confianza). Si el valor de  $X_c^2$  es menor que el valor límite, la hipótesis que la distribución adoptada ajusta a la muestra es aceptada, en caso contrario es rechazada. Cuanto más próximo a cero es el valor de  $X_c^2$  hay mayor concordancia entre la distribución teórica y la observada.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis de datos anuales y mensuales

En primera instancia se trabajó con datos de paso mensual, y es así que en la Figura 1 pueden observarse los valores de precipitación máxima y promedio mensual, por cada mes,

en la estación meteorológica de 30 de Agosto (EESA Nº 1) y la estación Trenque Lauquen, a la vez que se indica el promedio anual de todo el período común (1984 – 2015).

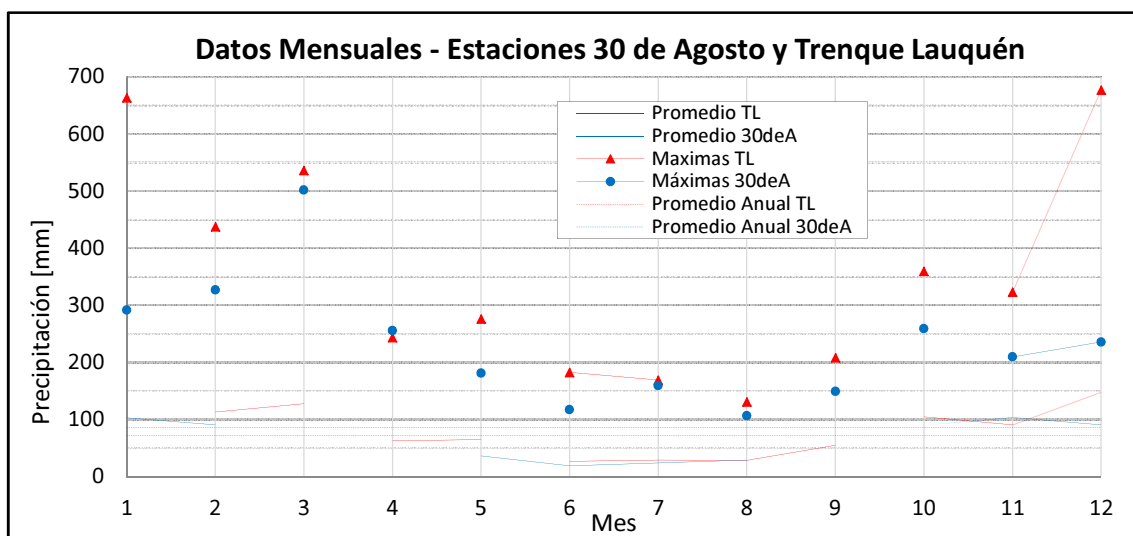


Figura 1: Datos mensuales. Comparación período común estaciones T. Lauquen y 30 de Agosto

De la Figura Nº 1 se desprende que los datos de Trenque Lauquen tienen un promedio levemente mayor a los de 30 de Agosto, las tendencias de los promedios mensuales son similares, y los valores extremos de la serie de Trenque Lauquen, en algunos casos, superan ampliamente a los de 30 de Agosto, lo cual puede asignársele a la mayor longitud de registro.

En la Figura Nº 2, se observa también para el período común de datos (1984-2015) la serie de precipitaciones anuales de Trenque Lauquen y de 30 de Agosto, y para cada serie se agrega además, la media móvil a 5 años, es decir el promedio de los valores de los 5 años continuos en relación al año central que se considera. Dicho valor se ubica en el centro (año 3) del período en correspondencia con dicho año.

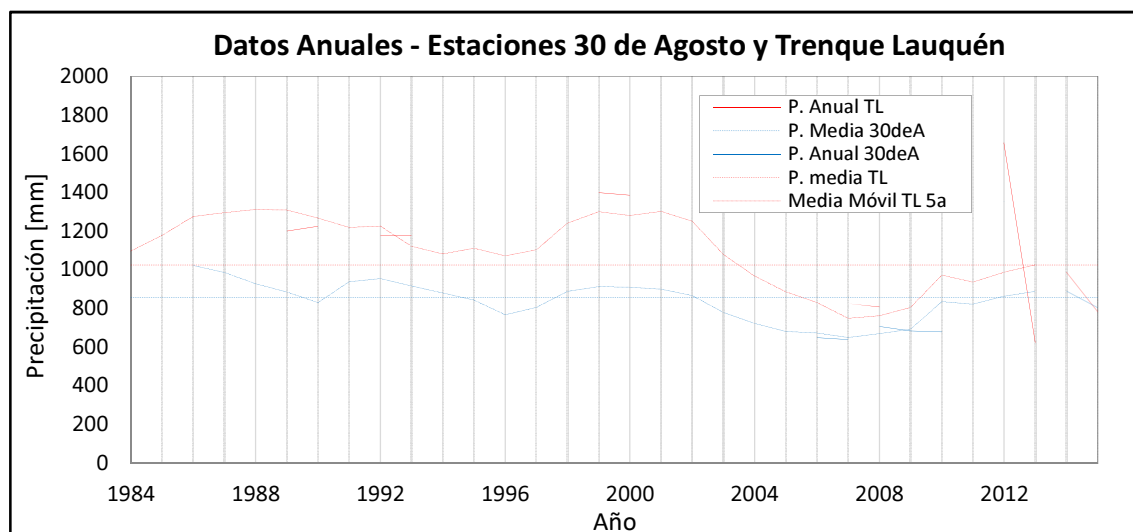


Figura 2: Datos anuales. Comparación período común estaciones T. Lauquen y 30 de Agosto

A partir de ambos gráfico se observa que los registros de Trenque Lauquen proporcionan un promedio mayor al de 30 de Agosto, y las medias móviles permiten reconocer una serie de años hidrológicos con mayor o menor volumen de agua precipitada. De esta forma, se puede determinar la tendencia de períodos húmedos o secos. En particular, el evento del 2 y

3 de Febrero del 2015, se ubica hacia el final de lo que parece un período seco, dando esto una primera idea de lo aislado de la ocurrencia de tal precipitación.

Asimismo se observa que la tendencia seguida por ambas series es similar, sobre todo en las medias móviles, si bien se observan algunas diferencias marcadas en algunos años particulares de la serie anual. Lo interesante es observar cómo la serie de Trenque Lauquen es “paralela” a la de 30 de Agosto, con una diferencia en los promedios de 169 mm (1024 mm y 855 mm respectivamente). Esto hace pensar que puede haber algún error en las mediciones, ya que al estar separadas tan sólo 40 km, en los promedios anuales de 32 años la aleatoriedad de las lluvias deberían producir una diferencia menor entre las precipitaciones en uno y otro punto. En este sentido podría pensarse que una estación estaría midiendo por exceso, o la otra por defecto, o ambas simultáneamente.

Esto mismo puede apreciarse en el gráfico de correlación entre ambas estaciones, representado en la Figura N° 3. El mismo se construye a partir de los 32 años que comparten ambas series. Cada punto surge de cruzar la precipitación en cada año para las dos estaciones, luego a la nube de puntos se le traza una línea de tendencia lineal.

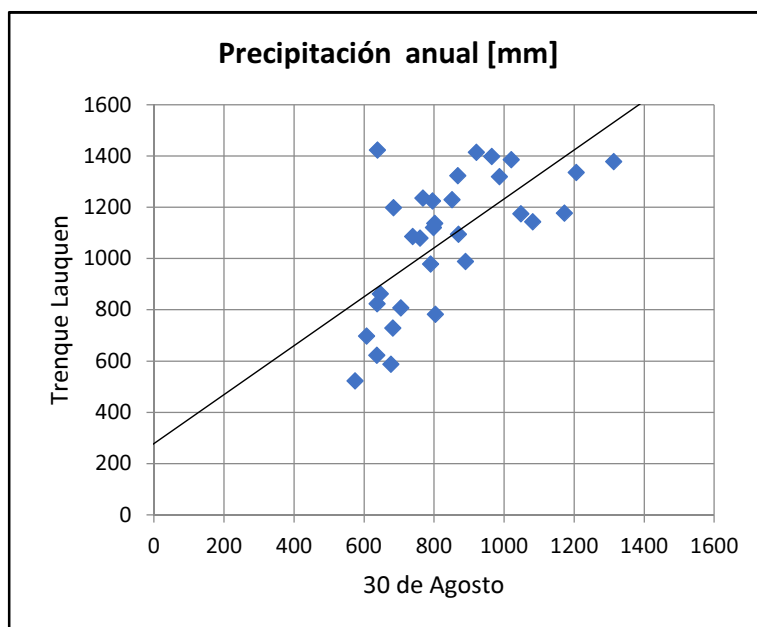


Figura 3: Datos anuales. Correlación entre estaciones

### Análisis de valores extremos

A modo de resumen de los análisis realizados, el resultado gráfico de los ajustes de las distribuciones Gumbel y Pearson III (en la misma escala Gumbel) a la serie de datos de 30 de Agosto se muestra en la Figura N° 4.

En ella, se observa que el ajuste Gumbel pareciera no ser el más adecuado para esta serie de valores, dado que muchos puntos del registro caen por fuera del ajuste, e incluso fuera de los límites de confianza. Asimismo puede observarse que el evento del 2 y 3 de Febrero cae por fuera de estos límites, con lo cual se sigue evidenciando la aleatoriedad del mismo. Cabe mencionar que mismo tratamiento se realizó para la serie de 105 años de Trenque Lauquen, obteniéndose iguales resultados.

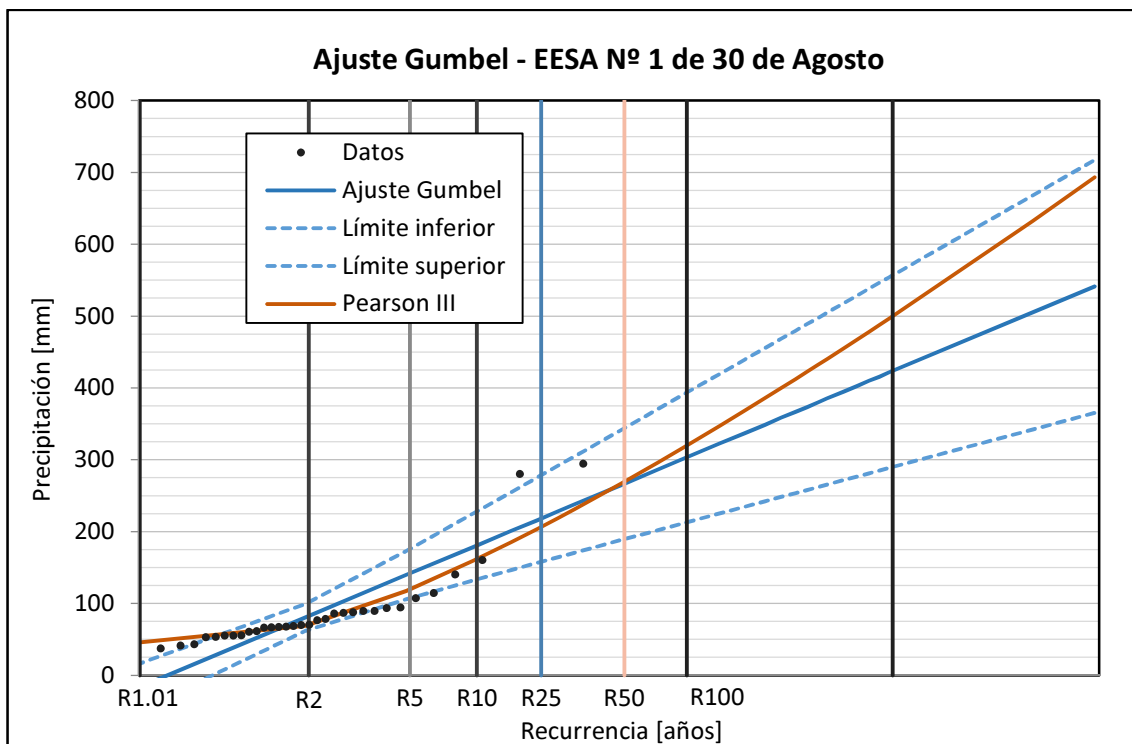


Figura 4: Análisis de valores extremos. Ajustes de Gumbel y Pearson III

Para ambas series, la aplicación del test de Chi-cuadrado dio como resultado los valores indicados en la Tabla N° 2.

Tabla N° 2: Resultado test de bondad Chi-cuadrado

Distribución	Serie Trenque Lauquen			Serie EESA N° 1		
	X <sup>2</sup> muestra	X <sup>2</sup> critico	Verifica	X <sup>2</sup> muestra	X <sup>2</sup> critico	Verifica
Gumbel	16,15	15,51	NO	20,74	7,81	NO
Pearson III	13,91	14,07	SI	5,90	5,99	SI

Para contrastar la bondad de los resultados obtenidos por el método anterior, se calculó el error medio cuadrático de las series, obteniéndose también en este caso un mejor ajuste con Pearson III y la menor variabilidad en los datos para la serie más larga.

### Recurrencia del evento del 2 y 3 de Febrero de 2015

Con los resultados del análisis precedente se procedió a estimar un valor para el periodo de retorno, o recurrencia, del evento del 2 y 3 de Febrero de 2015. Los valores obtenidos según los métodos y series utilizadas, se resume en la Tabla N° 3, siguiente.

Tabla N° 3: Recurrencia según distribución y serie

Distribución	Serie Trenque Lauquen (105 años)	Serie EESA N° 1 (32 años)
Gumbel	30 años	68 años
Pearson III	28 años	60 años

La variabilidad en cuanto a las series y distribuciones es muy amplia. Por lo pronto, se tomarán en cuenta las recurrencias obtenidas con Pearson III dado su mejor ajuste.

### Precipitaciones asociadas a recurrencias

A continuación, en la Tabla N° 4, se extraen para cada recurrencia considerada, los valores obtenidos de precipitaciones máximas diarias según los ajustes de Pearson III, para las dos series analizadas.

Tabla N° 4: Precipitaciones diarias asociadas a recurrencias

R [años]	Trenque Lauquen [mm]	EESA N° 1 [mm]
2	94,5	68,7
5	150,0	117,4
10	199,6	159,1
25	271,8	218,8
50	330,6	266,8
100	392,5	316,8
500	546,6	440,3

## CONCLUSIONES

Según los registros obtenidos, la distribución estadística que mejor representa el régimen de precipitaciones de la zona es la de Pearson III.

El análisis realizado permitió obtener una recurrencia para el evento del 2 y 3 de Febrero de 2015 que, si bien varía entre 28 y 60 años, puede considerarse como extraordinario, frente a lo cual cualquier sistema de desagües pluviales se vería superado en su capacidad, no pudiendo plantearse una solución únicamente mediante obras estructurales.

Se destaca la posibilidad de haber podido realizar este análisis gracias a la toma de datos que realiza la EESA N° 1 de 30 de Agosto. En ese sentido se insiste en la importancia de contar con series continuas y mediciones responsables, por ello, se ha recomendado a la Escuela seguir en este camino de registro y documentación de eventos meteorológicos.

Esta tarea, además de servir para la propia comunidad, con sus fines y mirada agropecuaria, interesa también para realizar este tipo de estudios y poder contribuir a un mejor entendimiento y modelación de eventos de lluvias extraordinarias.

Pero el objetivo más importante a cumplir con el presente trabajo, es el dejar en evidencia la importancia que tiene la obtención y el registro de datos meteorológicos locales, en especial de precipitación, costumbre que en algún momento estuvo muy arraigada en nuestro país pero que poco a poco se fue perdiendo. Los alumnos de la EESA N° 1 de 30 de Agosto se están educando en esa dirección, ya que son los responsables, junto a sus docentes, de las mediciones, procesamiento, e incluso divulgación en sitios de internet. Otro objetivo a cumplir será también mostrarles, en un caso concreto que involucra a su propia comunidad, la utilización real de esos datos, y la interpretación práctica de su procesamiento.

## BIBLIOGRAFÍA

- Beirlant, Jan et al. (2005); "Statistics of extremes"; Wiley.
- Caamaño Nelly, G., et al. (2003); "Lluvias de Diseño: conceptos, técnicas y experiencias", Ed. Científica Universitaria, Córdoba.
- Castillo, E. (1988); "Extreme value theory in engineering"; Acad. Press.
- Coles, Stuart (2001); "An introduction to statistical modeling of extremes values"; Springer.
- De Hann, Laurens y Ferreira, Ana (2006); "Extreme value theory, an introduction"; Springer.
- Gumbel, E. J. (2004); "Statistics of extremes"; Red. 1958, Dovel publications.

## PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACION DE UN PROGRAMA DE EXTENSION APLICADO AL MONITOREO HIDROLOGICO

Fernández, German<sup>1</sup>; Garat, Fermín I.<sup>1</sup>; García, Alejandro<sup>1</sup>; Bianchi, Guillermo J.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Alumnos de las carreras de Ingeniería Hidráulica y Civil FI-UNLP

<sup>2</sup> Integrante de la UIDET Hidrología – Dto. Hidráulica, FI-UNLP

UIDET Hidrología, Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNLP Calle 47 N° 200, Piso 1, Oficina 6, La Plata – Tel. 0221-427-5223

[bianchiguillermo1@gmail.com](mailto:bianchiguillermo1@gmail.com)

Palabras clave: precipitaciones, inundación, red hidrometeorológica, La Plata

### INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de datos hidrológicos para el desarrollo de los trabajos aplicados contenidos fundamentalmente, en las PPS y el Trabajo Final, constituyó el punto de partida de un profundo análisis sobre la disponibilidad de la información hidrológica y las posibilidades para acceder a ella.

Las inquietudes e ideas de un grupo de alumnos de las carreras de Ingeniería Civil e Hidráulica derivaron, en reflexiones sobre aspectos problemáticos de las redes de medición, su manejo y operatividad: escasa información en algunos casos, y/o mucha información dispersa y no integrada en una base única, en el otro extremo. A ello se suma la dificultad para acceder a los datos que, en muchos casos, resultaron sospechados por falta de homogeneidad (en calidad y con inapropiada distribución espacial, a los fines requeridos).

Con la finalidad de fortalecer esa área, con vistas a un mejor conocimiento y seguimiento de fenómenos climáticos e hidrometeorológicos, alumnos y docentes de la Facultad de Ingeniería de la UNLP (Universidad Nacional de La Plata) proponen la creación de un centro de información hidrometeorológica que, bajo la supervisión de los autores, desarrolle capacidades para adquirir, manejar y autenticar datos útiles en la previsión y evaluación de eventos.

El alcance de la propuesta está acotada, a los efectos de su aplicación, a la región de La Plata y sus alrededores. La escala del trabajo hace referencia a las cuencas de los principales arroyos de la región, sobre una superficie aproximada de más de 500 km<sup>2</sup> (*Figura 1*).

Para la caracterización de las variables meteorológicas de la región se cuenta con información ad-hoc proveniente de estaciones oficiales (SMN, INTA), pero por otra parte, en los últimos años se ha incorporado información "informal" proveniente de mediciones no oficiales. Fundamentalmente, luego de las inundaciones del 2013, la medición de la precipitación ha sido el principal objetivo de las

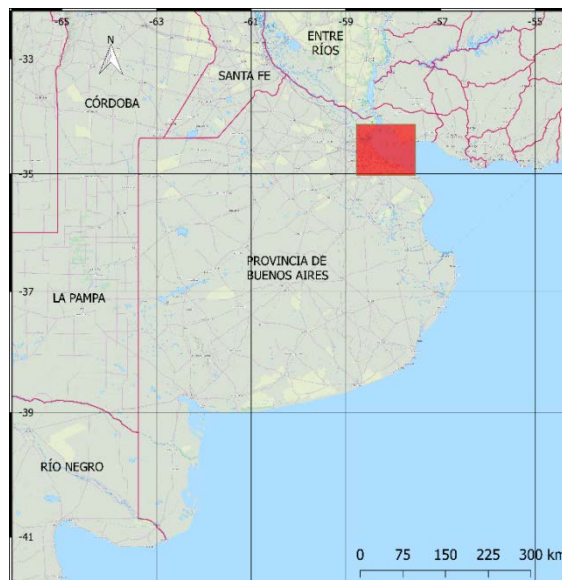


Figura 1 – Ubicación de la región de



propuestas de implementación de redes de alerta (Ref.1). En todos los casos, la información producida es, hasta el momento, incipiente, dispersa y poco accesible.

En este contexto, la propuesta que aquí se presenta constituye un ejercicio, con compromiso profesional, que desarrolle acciones que permitan la integración y sistematización de tal información.

La idea original se complementa con la implementación de estaciones meteorológicas automáticas propias, que serán controladas por el grupo de trabajo integrado por alumnos y docentes de la Facultad, a los efectos de disponer una muestra patrón de referencia para el contraste con el resto. Desde la perspectiva académica, la posibilidad de disponer estaciones propias constituye un incentivo educacional que permitirá un beneficioso acercamiento de los alumnos a las cuestiones técnicas.

## OBJETIVOS

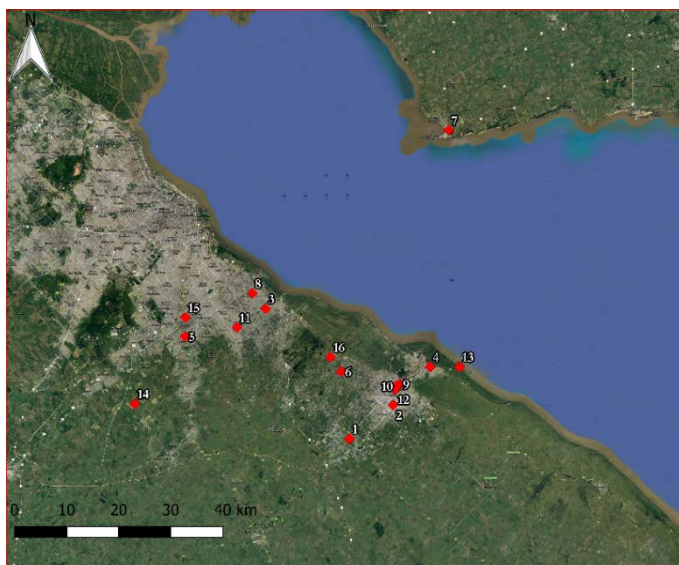
El proyecto tiene como principal objetivo la creación de una oficina de recopilación de información y procesamiento de datos hidrometeorológicos. Las actividades se desarrollarán en el Departamento de Hidráulica, con participación de alumnos de grado y docentes, en el marco de las actividades extracurriculares previstas por la Carrera de Ingeniería Hidráulica.

El trabajo se enmarca dentro de las líneas de investigación de la UIDET, sobre estudios aplicados a la variabilidad espacio temporal de las lluvias y al análisis de eventos extremos en la región, incluyendo la evaluación de sistemas de monitoreo hidrometeorológico en tiempo real como contribución a los sistemas de alerta temprana.(Ref.2 y 3).

Para alcanzar tal objetivo se establecen puntos específicos a desarrollar en corto y mediano plazo como asiento del conocimiento e integración de métodos y análisis de información existente y generación de nuevos datos:

### 1. Relevamiento de estaciones existentes de la región.

La región cuenta con varias estaciones en operación (*Figura 2*). Los sistemas existentes destinados a la medición, registro y almacenamiento de información pertenecen a distintos organismos con prácticas hidrológicas distintas en cuanto a responsabilidad, operación y destino. Históricamente los organismos provinciales (DPH, DIPSOH, DPOH, ADA), nacionales (SMN, INTA) y otros de carácter local y regional (Comités de Cuenca, Universidades y/o particulares) fueron los encargados de brindar dicha información. Sin embargo, en muchos casos, se trata de mediciones no sistemáticas, ni adecuadamente controladas, con periodos sin registro y falta de mantenimiento.



*Figura 2 – Detalle de las estaciones meteorológicas*

### 2. Evaluación e integración de datos existentes.

A partir de datos obtenidos de diferentes estaciones, relevando la cantidad y calidad de la información, se pretende el desarrollo de una base de datos única para el manejo y análisis

entrelazado de estaciones de distintas regiones, permitiendo comparar resultados de distintos fenómenos y además verificar la veracidad de la información obtenida en caso de problemas imprevistos.

3. Establecer una red confiable de estaciones meteorológicas.

El análisis de datos de las estaciones existentes permitirá orientar criterios para la conformación de una red representativa de la zona de estudio evaluando la fidelidad de datos obtenidos aportados por la estación y certificando la calidad de los mismos.

4. Estudios para la incorporación y localización de nuevas estaciones.

Para confirmar la veracidad de la información y dar validez a los datos de estaciones ajenas se pretende la incorporación de instrumental normalizado y tecnológicamente adecuado para medir los parámetros meteorológicos e hidrológicos, a disposición de la Facultad de Ingeniería y sus alumnos.

5. Implementación de un banco de datos.

Creación de un banco de datos propios unificado e integrado con el propósito de contribuir, a las diferentes entidades en particular y a la sociedad en general, información histórica de datos climáticos.

Su manejo y desarrollo tendrá como protagonistas a los alumnos de carrera y los docentes de la facultad.

6. Establecimiento de pautas organizativas para dar continuidad al proyecto.

Incluye los mecanismos de incorporación y renovación de recursos humanos, su capacitación y participación y el establecimiento de normas para el correcto funcionamiento de la oficina de información meteorológica, hidrológica y ambiental equipada con instrumental que brinde información confiable de aplicación a futuros estudios y proyectos.

7. Desarrollo y manejo de programas, esencialmente de base de datos y sistemas de Información Geográfica (SIG) para utilizarlos como herramientas en el desarrollo del proyecto.

8. Contribuir al conocimiento de la ciencia hidrológica y su cuantificación, promoviendo la normalización de las observaciones hidrometeorológicas y la difusión pública.

Dentro de las potencialidades del programa de trabajo, se aspira que los resultados contribuyan a mejorar la evaluación y observación en eventos determinados. Las metas a mediano plazo contemplan que toda la información integrada, sea: a) de utilidad a los requerimientos del Departamento de Hidráulica y sus UIDETs, y b) sea parte de una práctica extensionista que provea información consistente requerida por la comunidad.

## DESARROLLO

Se plantea a modo de ejercicio experimental, el estudio y análisis preliminar de los datos de estaciones de la región disponibles en la web, cuyo objetivo, en este caso, es ejemplificar la variabilidad zonal y mostrar el proceso de recopilación de la información.

Para ello se obtuvo la lectura de una red de estaciones meteorológicas no oficiales en La Plata y alrededores (*Figura 2*) que monitorean dirección y velocidad del viento, temperatura ambiente, precipitación, presión atmosférica, entre otros datos del tiempo, con los cuales se ha hecho un análisis de las variaciones observadas durante la semana del 13 al 20 de Octubre de 2016.

Como se mencionó anteriormente, la información disponible es suficientemente variada pero no confiable, ya que se trata de datos de estaciones que no están normalizadas por entidades responsables, frecuentemente afectadas por hechos vandálicos o falta mantenimiento. Debido a

esto es necesario realizar un análisis de los datos de cada una de las estaciones y realizar comparativas de las variables temporales con el fin de detectar anomalías en los sistemas de medición. Se analizarán todas las estaciones estudiadas en cuanto a su ubicación espacial-geográfica, sensibilidad a la inestabilidad de las diferentes variables meteorológicas, intervalos de tiempos de medición y periodos de análisis.

A partir de esta tarea se distinguen estaciones que estén en correcto funcionamiento y las que registren anomalías en sus lecturas, simplemente comparando las diferentes lecturas.

## **DISCUSIÓN Y RESULTADOS**

Para entender los problemas que se generan al momento de recopilar información de las estaciones de medición, se presentan las siguientes complicaciones que surgen en la puesta operacional del proyecto:

- La principal problemática al momento de obtener el dato crudo es la organización de los mismos para procesarlos y así realizar su evaluación.
- En la recopilación de datos nos encontramos con el inconveniente de la desaparición de alguna de las estaciones marcadas en el área de estudio, cuestión importante a tener en cuenta al momento de definir la red de lectura.
- Variabilidad temporal de registro de información debido a diferentes causas como: rotura del instrumento, agotamiento de batería, mala ubicación, vandalismo u otro desperfecto.

Para representar las características de los eventos sucedidos y realizar el análisis de calidad de la información, se graficó por un lado la variabilidad temporal de la temperatura (para un día) y por otro la curva masa, representada con el tiempo en el eje de abscisas (semana completa) y precipitación acumulada (mm) en ordenadas.

### **Análisis preliminar de resultados**

Análisis de precipitaciones: En el gráfico de precipitación acumulada (semana del 13 al 20 de octubre del 2016) podemos identificar escalones bien definidos de todas las estaciones, teniendo una particularidad en la medida de la estación de Punta Lara en donde podemos entender que en esa semana llovió muy poco, contrario a la estación ubicada en Villa Elisa en la cual se puede observar que se tiene la mayor precipitación acumulada de la semana y presenta un desfase de tiempo en relación a las demás estaciones.

Este es un punto clave y muy importante a tener en cuenta debido a la ubicación espacial de los instrumentos porque en una distancia relativamente corta como la de Punta Lara-Villa Elisa se registran lecturas con mucha dispersión. Este hecho requiere estudiar con más detalle el origen de tales inconsistencias en la información.

Análisis grafico de temperaturas: A partir del análisis comparativo de temperaturas diarias de las estaciones de la región, se puede observar que la mayoría de las estaciones tienen una gran semejanza en la marcha de los datos especialmente en los horarios matutinos (para esta época del año), aunque diferenciándose en sus máximos de temperatura y desfases. En cuanto a los intervalos de medición de una determinada estación, lo que puede llegar a ser un problema es la sincronización horaria del artefacto (en la actualidad el huso horario de la región es UTC – 03:00, p).

A partir de determinada hora (9:00 a 10:00 hs.) en todas las estaciones se puede apreciar un ascenso homogéneo de la temperatura por efecto de la radiación solar.

Las temperaturas máximas y mínimas varían según el tipo de exposición y ubicación de las estaciones. Las emplazadas en regiones urbanas presentan un mayor rango de variación de temperaturas, y variaciones temporales para el pico de temperatura máxima, uno coincidente

con las estaciones suburbanas y otro luego de un intervalo de 2 a 3 horas, probablemente resultado de la influencia de la radiación emitida por la zona urbana. Luego de estos picos el descenso es suave hasta alcanzar las temperaturas mínimas. (Figuras 4 y 5)

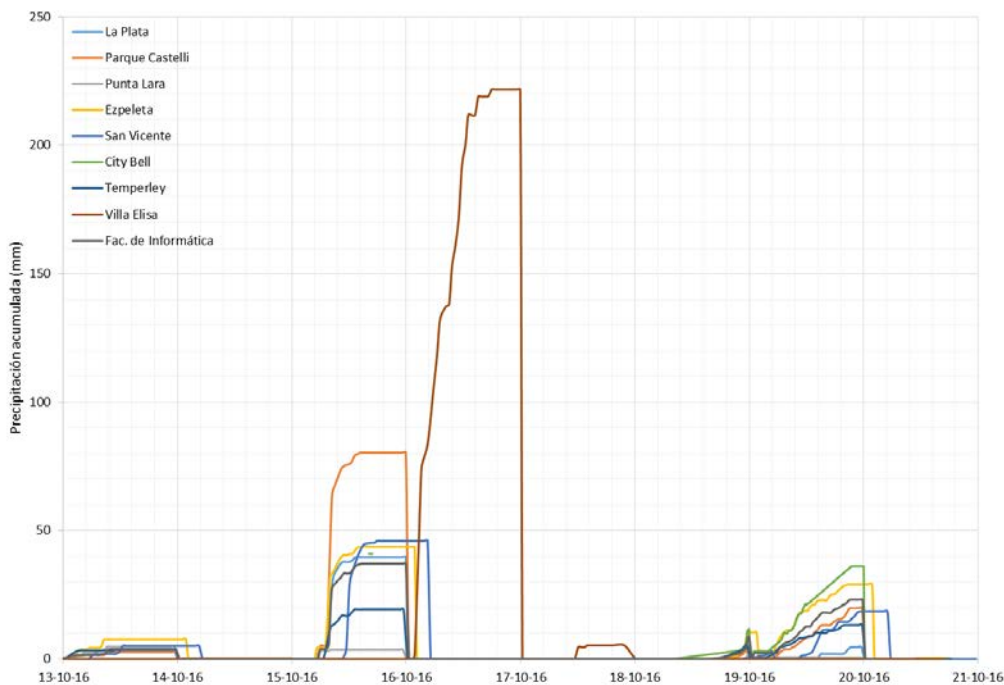


Figura 3 – Curva Masa de precipitaciones

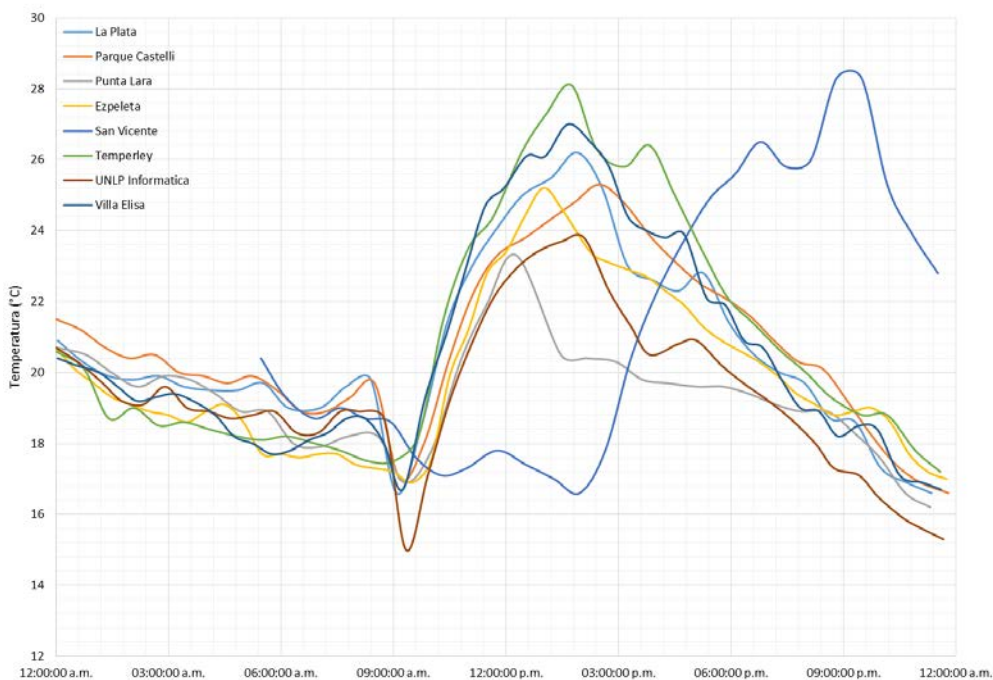


Figura 4 – Variabilidad térmica para el día 13 de Octubre de 2016



Las estaciones ubicadas en zonas descampadas con mayor influencia del viento y expuestas a menor efecto de la radiación emitida por las construcciones adyacentes influenciarían sobre las menores temperaturas máximas y una caída más abrupta de la temperatura a partir de la hora de pico máximo (12:00 a 14:00 hs.).



Figura 5 – Temperaturas máximas diarias espaciales

## CONCLUSIONES

La demanda de datos básicos hidrológicos para el desarrollo de los trabajos aplicados, constituyó el punto de partida del grupo de trabajo (alumnos de las carreras de Hidráulica y Civil), interesados en sistematizar la disponibilidad de la información hidrológica y las posibilidades para acceder a ella.

Mediante un ejercicio experimental, se efectuó un diagnóstico preliminar sobre la problemática de las redes de medición, y como incide en la comprensión de los fenómenos, la escasa información en algunos casos, y/o la mucha información dispersa y no integrada en una base única, en otros.

Se ejemplifica el manejo integrado de los datos y se detectan inconsistencias

Con la finalidad de fortalecer esa área, tratando de ampliar el conocimiento y seguimiento de fenómenos climáticos e hidrometeorológicos, alumnos y docentes de la Facultad de Ingeniería de la UNLP (Universidad Nacional de La Plata) proponen la creación de un centro de información hidrometeorológica, con capacidad para adquirir y manejar datos útiles en la previsión y evaluación de eventos hidrometeorológicos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Departamento de Hidráulica, (2013). **“Estudio sobre la inundación ocurrida los días 2 y 3 de abril de 2013 en las ciudades de La Plata, Berisso y Ensenada.”** Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, UNLP. Bianchi. G., colaboración estudios hidrológicos, La Plata
- [2] World Meteorological Organization (WMO) 2008. **“Guide to meteorological instruments and methods of observation”**. WMO-8 8 1-681
- [3] World Meteorological Organization (WMO) 2006. **“Initial Guidance To Obtain Representative Meteorological Observations At Urban Sites”** T.R. Oke, ed. Instruments And Observing Methods Report No. 81 WMO/TD-No. 1250 2006

## SANEAMIENTO HÍDRICO DEL BARRIO ROMERO CAMPO. UNA EXPERIENCIA DE TRABAJO DE EXTENSIÓN CON LA COMUNIDAD DE LA PLATA

Valinoti, Stefania<sup>1</sup>; Cioffi, Julieta<sup>1</sup>; Branne, Julia<sup>1</sup>; Jaca Pozzi Guadalupe<sup>1</sup>;  
Rossi, Luciano<sup>1</sup>; Bonoldi, Joaquín<sup>1</sup>; Heimbigner, Nicolás<sup>1</sup>; Dalinger, Nicolás<sup>1</sup>;  
Eseyza, José<sup>2</sup>; Angheben, Enrique<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Alumnos colaboradores de la UIDET Hidrología – Dto. Hidráulica, FI-UNLP

<sup>2</sup> Integrantes de la UIDET Hidrología – Dto. Hidráulica, FI-UNLP

UIDET Hidrología - Departamento de Hidráulica - Facultad de Ingeniería - UNLP  
Calle 47 N° 200, piso 1, Oficina 6, La Plata - Tel. 0221-427-5223  
eangheben@hotmail.com

**Palabras Clave:** Extensión, Romero Campo, Riesgo Hídrico

### INTRODUCCIÓN

En el marco del Proyecto de Extensión, “Elaboración de la información de base necesaria para el saneamiento hídrico del Barrio Romero Campo”, alumnos y docentes de la Facultad de Ingeniería, junto a otros de otras facultades de la UNLP, realizaron durante los años 2015 y 2016, tareas comunitarias en el barrio Romero Campo, un asentamiento precario ubicado en la periferia de la ciudad de La Plata, limitado por las calles 516, 516 bis, 161 y 167, y en gran parte emplazado sobre las vías del ferrocarril Ramal La Plata - Brandsen, actualmente desactivado.

Fundamentalmente el objetivo perseguido por los alumnos en el trabajo de extensión fue el de servir a la comunidad, y poner en práctica los conceptos y saberes recibidos en las aulas, como futuros ingenieros comprometidos con ella. Habiendo observado las necesidades que posee el barrio, se propuso buscar una solución para mejorar su situación actual, en el marco de un proyecto integral, donde el propósito es lograr el saneamiento hídrico del Barrio Romero Campo.

Pero para ello fue necesario contar con información de base inexistente hasta ese momento, tal como un relevamiento planialtimétrico, datos de población, viviendas, caracterización del agua de consumo y el agua servida, entre otros.

Con el avance de los trabajos surgieron actividades que no habían sido previstas originalmente, resultando nuevos desafíos que pudieron ser superados con el trabajo en equipo y el apoyo de estudiantes de otras facultades, en particular el Grupo de Trabajo Barrial (GTB) que desde hace años está presente en el barrio Romero Campo y le permite dar continuidad a la propuesta.

### DESARROLLO DE LA EXPERIENCIA

El trabajo se llevó adelante concurriendo semanalmente al Barrio Romero Campo. En esas recorridas y actividades con los vecinos se logró crecer en el afecto y cercanía con ellos, lo cual permitió ir conociendo sus inquietudes, problemas y deseos.

A partir de la implementación de una encuesta domiciliaria se pudo caracterizar al barrio, obteniendo datos sobre cantidad de habitantes por vivienda, situación laboral y estudios de cada integrante familiar, salud y acceso a ella, tipo de construcción de las viviendas y datos afines como presencia de humedad, inundaciones, descargas de desechos cloacales, etc.



En forma complementaria se realizó un relevamiento topográfico del barrio, lo cual permitió tener una idea acabada de la complicada estructura habitacional del mismo y de su sistema de desagües pluviales. A partir de ello se elaboraron planos y perfiles de las calles, caracterizando así el relieve del lugar, la ubicación de las alcantarillas y características geométricas de las zanjas.

Para completar las tareas de campo, se tomaron muestras de agua en diferentes hogares, buscando identificar el tipo de agua de consumo. Tarea similar se realizó en relación al estado de las aguas presentes en zanjas frentistas y bajos.

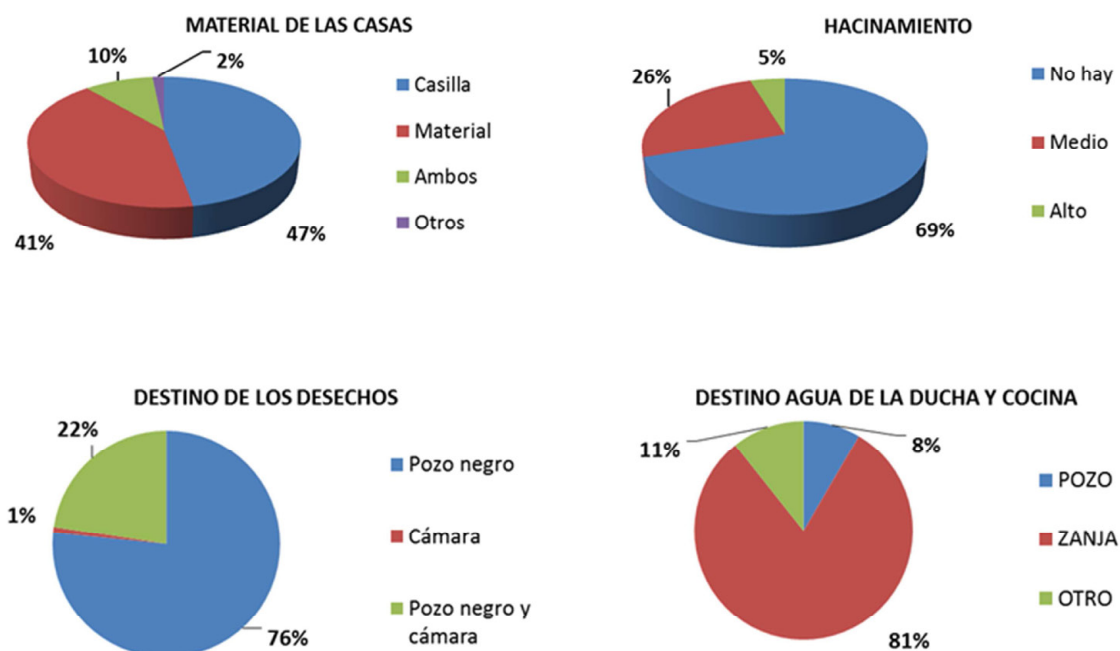
Estas actividades se enlazaron con otras realizadas en el comedor del barrio, como la copa de leche, el apoyo escolar, el festejo del día del niño, la construcción de un baño para dicho comedor, etc.

Todas estas tareas generaron un vínculo estrecho entre los estudiantes y el barrio, que se puso de manifiesto cuando, ante actividades como las encuestas o la toma de muestras de agua, fueron bien recibidos e invitados a pasar a los hogares.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el barrio se identificaron alrededor de 200 terrenos, en los cuales se distinguieron distintas situaciones: casas en construcción, casas deshabitadas, zona de quintas, terrenos con más de una vivienda donde vivía más de una familia, terrenos con casas unifamiliares y terrenos baldíos. De este número estimativo de lotes, se logró encuestar 132 viviendas, contabilizando un total de 559 personas.

Los resultados más relevantes desde el punto de vista de las características de las viviendas, condiciones de habitabilidad y sobre todo saneamiento hídrico, se muestran en la Figura N° 1, siguiente.



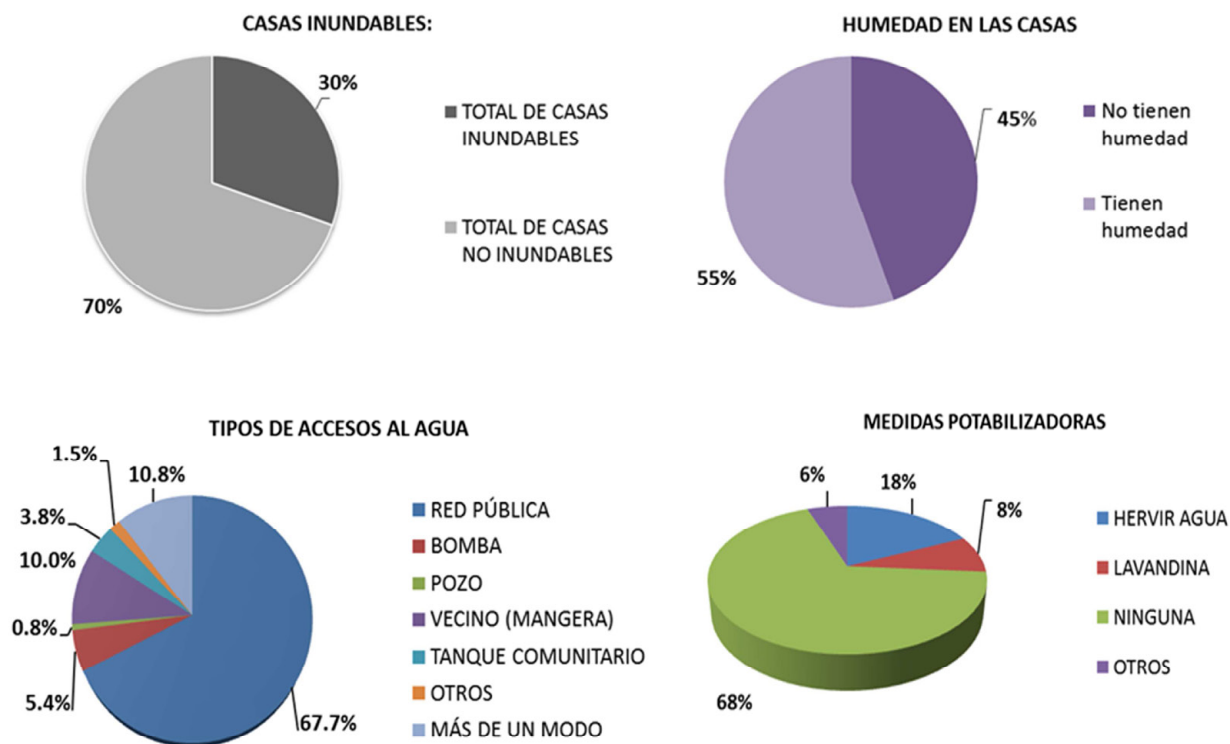


Figura N° 1: Barrio Romero Campo. Gráficos resultantes de las encuestas.

Justamente desde este último aspecto, el saneamiento hídrico, particularmente relacionado con los objetivos del proyecto de extensión, cabe resaltar que el 81% de los efluentes domiciliarios se vuelca a las zanjas frentistas, el 8,5% a pozo negro, y el porcentaje restante a otros destinos. El 76,6% de las viviendas poseen pozo negro, pero sólo el 22,6% tiene cámara séptica. El acceso al agua "potable" es muy variado (desde conexión a red pública a tanque comunitario), pero uno de los datos más importantes derivados de las encuestas es que el 68% de los hogares no realiza medidas potabilizadoras, el 18% hierve el agua, 8% utiliza lavandina y el resto algún otro método particular.

Complementariamente se tomaron en conjunto con el "Taller de Aguas" del Programa Ambiental de Extensión Universitaria (PAEU), de la Facultad de Ciencias Exactas (UNLP), un total de ocho (8) muestras del agua que consumen habitualmente los habitantes del barrio, tanto de pozo de bombeo como de red. A dichas muestras se les realizó un análisis fisicoquímico y microbiológico, con el objetivo de poder caracterizarlas y evaluar su potabilidad.

Dichos análisis concluyeron en que únicamente tres (3) de las ocho (8) muestras resultaron potables, y el resto si bien fisicoquímicamente eran potables, microbiológicamente no, siendo necesario agregar dos gotas de lavandina por cada litro de agua para su potabilización. Por otra parte también determinaron que el agua de consumo contiene nitratos y nitritos, que al hervirlos aumentan su concentración y pueden ser perjudiciales para la salud, por lo tanto se observó la necesidad de no hervirla.

Respecto al agua de zanjas pluviales frentistas y bajos, entre diferentes puntos del barrio se tomaron seis (6) muestras de agua, a las que el Instituto de Limnología "Dr. Raul A. Ringuelet" (ILPLA-CONICET) les realizó un análisis bacteriológico, resultando en todos los casos "Agua contaminada por líquidos cloacales" con presencia de "Bacterias Coliformes fecales" en elevadas concentraciones (>23.980 NMP/100ml), y la calificación de "No Apta para Uso Recreativo", dada por las normas vigentes.

La comprensión y el análisis de toda esta información recopilada derivaron en la necesidad de hacer actividades de difusión y concientización sobre el uso del agua. En primera instancia se elaboró un “panfleto” sencillo (Figura N° 2), con las indicaciones que los integrantes del Taller de Aguas brindaron respecto a las medidas a tomar, el cual fue repartido por las viviendas y puntos estratégicos del barrio (copa de leche, salita de primeros auxilios, etc.).



Figura N° 2: “Panfleto” inicial de difusión.

Posteriormente, se elaboró un “tríptico” con mayor contenido, sumando al tratamiento que debía hacerse al agua de consumo, recomendaciones sobre el cuidado de los desechos que van a la cloaca y el mantenimiento de zanjas y alcantarillas, entre otras cosas. También se agregó al mismo, los resultados más relevantes de las encuestas relacionados con el agua. Este tríptico se muestra en las Figuras N° 3 y N° 4, siguientes.

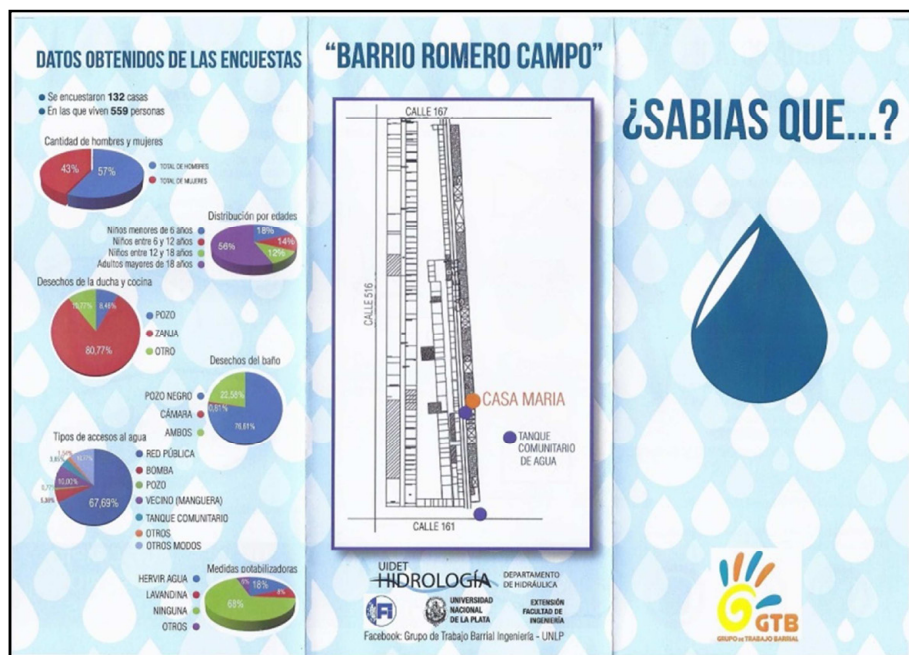


Figura N° 3: Tríptico de difusión. Cara exterior

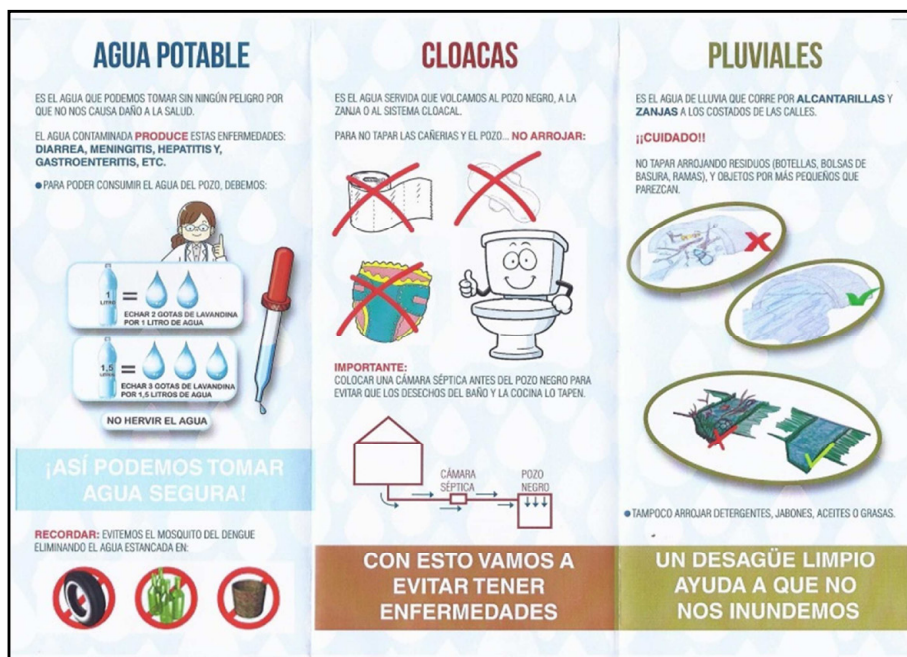


Figura N° 4: Tríptico de difusión. Cara Interior

De manera simultánea a las tareas descritas anteriormente, se realizó un relevamiento planialtimétrico de detalle de las calles periféricas del barrio y sus desagües pluviales, conformado principalmente por zanjas frentistas y alcantarillas. El mismo se realizó gracias a la ayuda de docentes y alumnos del Departamento de Agrimensura de la Facultad de Ingeniería (UNLP).

Para ello se utilizó una Estación Total, prestada por esa Facultad, para obtener perfiles transversales cada 50 m y efectuar la determinación de las cotas de los desagües, las calles y entradas a las casas o garajes. Para los perfiles transversales se tomaron principalmente los datos del eje de la calle, borde de calzada, perfiles de zanjas y línea municipal. Todas las alcantarillas existentes y fondos de zanja también fueron relevados para hacer posible identificar la existencia de contra pendientes y obras mal colocadas, que obstruyeran el escurrimiento o provocaran puntos bajos donde se acumule el agua.

Como resultado del mismo se elaboró una planimetría del barrio, que permitió identificar la ubicación de lotes y familias, y otros planos de detalle y perfiles longitudinales específicos, para evaluar el sistema de desagües pluviales (zanjas, alcantarillas y cunetas) existentes, y permitir proponer mejoras al sistema.

## CONCLUSIONES

El trabajo realizado en el barrio permitió tomar conocimiento concreto sobre la situación de vulnerabilidad en la que se encuentran sus habitantes. En particular se puede afirmar que el barrio Romero Campo se encuentra en un estado de vulnerabilidad hídrica, que se pone de manifiesto en su relación con el agua potable, sus desagües cloacales y su sistema pluvial (inundaciones), que pone en riesgo la salud de su población y la infraestructura de las viviendas.

Los resultados se fueron obteniendo con el trabajo de los alumnos en forma escalonada, y marcaron los pasos a seguir. En base a esos resultados se realizaron campañas de difusión, tendientes a que la gente tomara conciencia de los problemas y tuviera herramientas para poder mitigarlos, en alguna medida. El relevamiento topográfico, permitió tener una idea acabada de la complicada estructura habitacional del barrio y de su sistema de desagües pluviales.



Pero ese estado de vulnerabilidad hídrica a la que se encuentran expuestos tiene su contraparte en la legislación nacional e internacional, que es clara al respecto y sienta las bases para que esa vulnerabilidad deba ser revertida. En efecto, nuestra Constitución Nacional (C.N.), a partir del art. 41, establece presupuestos mínimos ambientales. Según ese precepto legal, *“Todos los habitantes gozan del derecho a un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo humano...”*, y siempre dentro del amparo constitucional, y por aplicación del art. 75 inc. 22 de la C.N., se encuentra la Resolución 64/292, de la Asamblea General de las Naciones Unidas, por la cual se reconoce explícitamente el derecho humano al agua y al saneamiento, reafirmando que un agua potable limpia y el saneamiento son esenciales para la realización de todos los derechos humanos.

Asimismo, numerosos documentos de organizaciones internacionales, incluyen declaraciones en ese sentido, como la que surge de la Observación General N° 15 del "Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales" de Naciones Unidas, en virtud de la cual se menciona que: "El agua es un recurso natural limitado y un bien público fundamental para la vida y la salud. El derecho humano al agua es indispensable para vivir dignamente y es condición previa para la realización de otros derechos humanos".

Pero es importante incluir también en estas conclusiones, uno de los aspectos más importantes del Proyecto de Extensión, cual es la experiencia del grupo de alumnos en el hecho de haber aplicado los conceptos aprendidos en las aulas, a una realidad concreta, a partir de una necesidad específica. El identificar una problemática y abordarla, fue un desafío para los estudiantes, así como también ir resolviendo los problemas junto con las adversidades que se fueron presentando, permitiéndoles crecer, al tener que tomar decisiones y hacerse responsables de ellas.

El trabajo realizado es una experiencia enriquecedora desde lo personal, como estudiantes y docentes, hasta lo colectivo, como grupo humano, capaz de trabajar en equipo, relacionándose con los demás, y tratando de resolver las problemáticas de manera conjunta con los vecinos del Barrio Romero Campo.

## BIBLIOGRAFIA

- Proyecto civil barrio Romero Campo y alrededores.
- Carpeta de trabajos prácticos de la materia Topografía (C450). Año 2013.
- Apunte Modulo II, de la materia Topografía (C450). Año 2013.
- Apuntes de Clase Cátedras de Ingeniería Civil e Hidráulica. Año 2013/2014
- Lavell, A. 1996. "Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación". En Ciudades en Riesgo. Comp. MA, Fernández. Perú, La Red.
- Orsolini, H., Zimmermann, E., Basile, P., "Hidrología. Procesos y Métodos". UNR Editora. Rosario. Año 2000.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). Informe acerca de los progresos sobre el agua potable y saneamiento. Año 2010.
- Programa Naciones Unidas para el Desarrollo. Informe sobre Desarrollo Humano 2006. "Más allá de la escasez: Poder, pobreza y la crisis mundial del agua". Año 2006.
- Sejenovich H., "La gestión del agua y los sectores sociales" en Revista HYDRIA N° 19. Año 2008.
- Tucci, C. M. E., "Gestión de Inundaciones Urbanas". Porto Alegre. Año 2006.
- Tucci, C. M. E., Bertoni J. C., "La urbanización y su impacto sobre la gestión del agua" en Revista HYDRIA N° 9. Año 2007.

## EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA SUPERFICIAL DE UNA CUENCA URBANA DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

**Salvioli Mónica Laura, Guerrero Borges Verónica, Cipponeri Marcos, Calvo Gabriela Helena, Di Lucente Fiorella y Paredes Diana Marcela**

UIDET Gestión Ambiental - 47 N°200 – 1900, La Plata. [msalvioli@ing.unlp.edu.ar](mailto:msalvioli@ing.unlp.edu.ar)

### INTRODUCCIÓN

La calidad del agua superficial es función de las características intrínsecas de los recursos hídricos y su entorno así como de las actividades u ocupación efectiva del territorio que se desarrolla en las cuencas. Su diagnóstico es una estrategia relevante en la planificación y ordenamiento de los usos del suelo y en el establecimiento de medidas estructurales y no estructurales de gestión que tengan como objetivo minimizar el estado de degradación ambiental y mejorar la calidad de vida de la población asociada, en especial en las cuencas de carácter predominantemente urbano. En este marco, los índices de calidad del agua (ICAs), son herramientas de síntesis y de gestión útiles para conocer el estado del recurso, analizar la evolución o tendencias espacio-temporales, eficiencia de programas en ejecución y comunicar de una manera sencilla y de fácil interpretación los resultados obtenidos, entre otros.

Los ICAs reducen en su construcción la información correspondiente a una gran cantidad de parámetros físicos, químicos y microbiológicos a un solo valor numérico resultante de la agregación de determinados parámetros seleccionados en base a su representatividad respecto de la calidad del recurso hídrico evaluado.

En este trabajo se analizan los valores de calidad del agua superficial registrados en dos períodos de estudio: años 2010 y 2015, en la cuenca del arroyo Conchitas-Plátanos, partidos de Florencio Varela y Berazategui, provincia de Buenos Aires, con el objeto de analizar la evolución espacio - temporal de la calidad del agua superficial, asociar los resultados obtenidos con los usos reales del suelo y proporcionar información útil para facilitar una correcta gestión de los usos del suelo en el marco de la gestión integrada de cuencas.

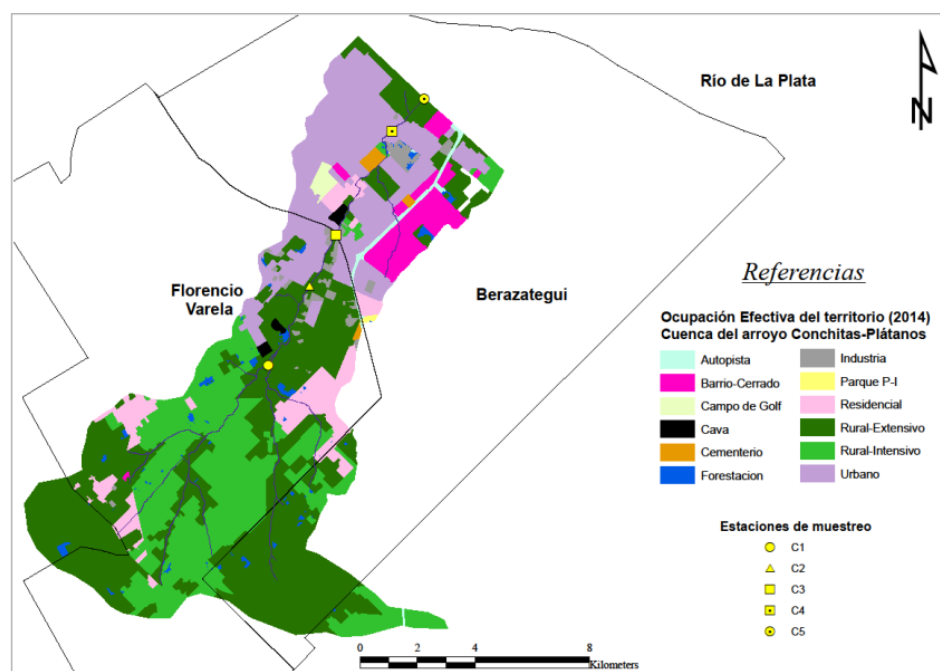
### MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio: la unidad territorial analizada ha sido la cuenca del Arroyo Conchitas-Plátanos, perteneciente al Comité de Cuenca Vertiente del Río de la Plata Superior, ubicada en el NE de la provincia de Buenos Aires, partidos de Florencio Varela y Berazategui. Los tramos superior y medio de la cuenca corresponden a la Terraza o Llanura Alta de la región Pampeana, mientras que el tramo inferior se localiza en la Llanura o Planicie costera, con cotas e/ 0 – 5 msnm. Presenta forma alargada, cuenta con una significativa red de drenaje, ocupa una superficie de 13.711,71 has y presenta una longitud de 23.88 Km. Se trata de una cuenca urbana compleja por la diversidad de actividades y su distribución en el territorio, que ocupa una superficie de 13645,5 has. Los usos del suelo reales dominantes son el urbano e industrial en la cuenca media, y el rural en los tramos superior e inferior.

Determinación de la ocupación efectiva del territorio: mediante campañas realizadas en los años 2010 (en el marco del “*Plan Piloto de Gestión de cuencas hídricas de pequeñas dimensiones. Cuencas arroyos Conchitas-Plátanos y Baldovinos*” efectuado para la Autoridad del Agua, pcia. de Bs. As.) y 2015; se efectuó observación directa y registro sistematizado de diferentes intervenciones y ocupaciones del suelo con el objeto de actualizar información aportada por procesamiento de imágenes.



Establecimiento de estaciones de medición y muestreo: la identificación de estaciones se efectuó en base a: morfología de la cuenca, usos y ocupación efectiva dominante del suelo y accesibilidad. Se seleccionaron en total 5 estaciones distribuidas en tramo superior (C1: uso rural), medio (C2: uso industrial – C3 y C4: usos urbano e industrial) y límite con inferior (C5: residencial y comercial), según se aprecia en la Figura 1.



**Figura 1. Mapa de Estaciones de Muestreo y Ocupación Efectiva del Territorio**

Muestreo y medición de agua superficial: se procedió a establecer la calidad del agua superficial en base a muestreos y análisis de laboratorio así como mediciones *in situ*, de diversos parámetros físico-químicos y microbiológicos, seleccionados en función de la representatividad de los usos del suelo dominantes y de los recursos disponibles. Se realizaron dos campañas de muestreo en la primavera de los años 2010 y 2015. La recolección manual de muestras se efectuó a contracorriente y aguas abajo de puntos conflictivos. Para las mediciones *in situ* se utilizaron los equipos: Dissolved Oxygen Meter – HI 9146 - Hanna Instruments y pH/EC/TDS – Waterproof Family - HI 98129 – Hanna Instruments.

Análisis de resultados: se analizaron los resultados de los parámetros más representativos en forma individual. Se efectuó un análisis de ICAs antecedente, y se seleccionó para su aplicación el Índice de Calidad del Agua de la National Sanitation Foundation (INSF) de USA (Fernández Parada, N. J. y F. Solano Ortega, 2005), desarrollado en 1970 por Brown, MacClelland, Deininger y Tozer, con el apoyo de la National Sanitation Foundation de USA, el cual permite establecer la calidad general del agua superficial. Puede ser utilizado para medir los cambios en la calidad del agua en tramos particulares de cursos superficiales a través del tiempo, para comparar la calidad del agua de diferentes tramos del mismo curso y además para comparar la calidad de agua de diferentes cuerpos hídricos alrededor del mundo. Este índice establece 5 categorías de calidad del agua (Tabla 1) y utiliza 9 parámetros ponderados (Tabla 2).

Tabla 1. Escala de calidad de agua para el INSF

CLASE - CALIDAD DEL AGUA	VALOR DEL ICA	DESCRIPCIÓN
<b>Muy Mala</b>	0 - 25	Solo puede soportar un número limitado de organismos acuáticos, pudiendo esperarse que tenga grandes problemas de calidad. Normalmente no se considera aceptable para actividades que involucren el contacto directo con el agua.
<b>Mala</b>	26 - 50	Puede soportar una baja diversidad de vida acuática y probablemente experimente problemas de contaminación.
<b>Regular</b>	51 - 70	Posee menos diversidad de organismos acuáticos y frecuentemente manifiesta un crecimiento anormal de algas.
<b>Buena</b>	71 - 90	Puede soportar una alta diversidad de vida acuática y es apropiada para todo tipo de recreación y para la toma de agua para potabilización.
<b>Excelente</b>	91 - 100	

Tabla 2. Peso de las variables incluidas en el INSF

Parámetro	Peso
Oxígeno disuelto (% de saturación)	0.17
Coliformes fecales	0.15
pH	0.12
DBO <sub>5</sub>	0.1
NO <sub>3</sub>	0.1
PO <sub>4</sub>	0.1
Desviación de temperatura	0.1
Turbidez	0.08
Sólidos totales	0.08

## RESULTADOS

Según la Tabla 3, el muestreo del año 2015 presentó valores más favorables para la mayor parte de los parámetros medidos. En ambos años se observó a partir de la estación C3 (sector donde se concentra urbanización y actividad industrial), un cambio significativo negativo para la mayor parte de los parámetros. Se registraron condiciones anóxicas en varias estaciones en el 2010, asociadas con elevadas temperaturas del agua; a diferencia del 2015, si bien aquí también se dieron situaciones críticas a partir de C3. Los coliformes fecales representaron un elevado riesgo sanitario por contacto directo en todas las estaciones en ambos períodos, si bien el muestreo del 2010 contó con órdenes de magnitud superiores a los registrados en el 2015. Se observaron condiciones de eutrofización en el 2010, no así en el 2015.

Tabla 3. Resultados de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua superficial

PARÁMETROS	ESTACIONES – MUESTREO 2010					ESTACIONES – MUESTREO 2015				
	C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C4	C5
Temperatura °C	19.4	29	29.9	29.9	31	15.6	17.9	19.2	18.5	19.5
OD mg/l	0	1.4	0.53	0	0	9.88	8.79	4.04	3.14	2.67
OD % Sat	0	19	7	0	0	101	91.9	47.3	36.2	30.6
Cond electr. uS/cm	811	874	2400	2280	2160	783	1022	1326	1442	1442
pH	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.92	7.99	7.88	7.3	7.79
STD mg/l	565	562	1469	1410	1345	392	512	658	730	719
SST mg/l	19	34	77	71	34	16	23	230	94	57
STS 105°C mg/l	584	602	1626	1542	1446	555	709	1164	1101	1012
Nitratos mg/l	14.7	11.6	0.6	0.8	0.6	1.2	2.5	<0.5	<0.5	<0.5
Nitritos mg/l	0.648	0.299	0.005	<0.005	<0.005	0.763	1.405	0.005	<0.005	<0.005
Fósforo total mg/l	0.52	1.06	1.07	0.42	1.73	0.81	1.15	<0.01	0.49	0.56
Clorofila mg/l	43.8	14.5	25	31	41	10	4	4	2	1
DBO mg/l	41	61	109	127	93	7	10	105	106	61
DQO mg/l	42	73	131	162	145	21	38	196	152	83
Colif fec NMP/100ml	2,3 10 <sup>3</sup>	2,3 10 <sup>4</sup>	2,3 10 <sup>6</sup>	1,5 10 <sup>7</sup>	2,3 10 <sup>6</sup>	2,3 10 <sup>2</sup>	2,3 10 <sup>3</sup>	2,3 10 <sup>2</sup>	2,3 10 <sup>3</sup>	9,3 10 <sup>3</sup>

\* LEY 24.051. Residuos Peligrosos. Decreto 831/93. Tabla II - Niveles guía de calidad de agua para protección de vida acuática. Agua dulce superficial.

\*\*Subsecretaría de Recursos Hídricos de Nación. Niveles Guía de Calidad Agua Ambiente. Uso: Protección de Vida acuática

\*\*\* Resolución 42/06 - FREPLATA, ADA y SPA. Niveles guía para agua dulce - Protección vida acuática

\*\*\*\*Río de la Plata. Calidad de las Aguas FRANJA COSTERA SUR. AGOSBA-OSN-SIHN. 1992. Niveles Guía de Calidad del Agua - Uso IV: Protección de la vida acuática

\*\*\*\*\*Río de la Plata. Calidad de las Aguas FRANJA COSTERA SUR. AGOSBA-OSN-SIHN. 1992. Estándares de calidad río Uruquav (protección vida acuática)

\*\*\*\*\*Resolución 336/03 Ministerio de Asuntos Agrarios y Producción de la Pcia. de Buenos Aires. Parámetros de calidad de descargas límites admisibles. Agua superficial

Según la Figura 2, los valores registrados para ambos años estuvieron dentro de las categorías de regular a malo (respecto de la escala correspondiente a la Tabla 1); se observó tendencia a un incremento en los valores de calidad del año 2015 respecto del 2010, y de disminución del valor de calidad del agua desde la cuenca superior a media – inferior para el año 2015. En el 2010 no se observó variabilidad a lo largo de la cuenca.

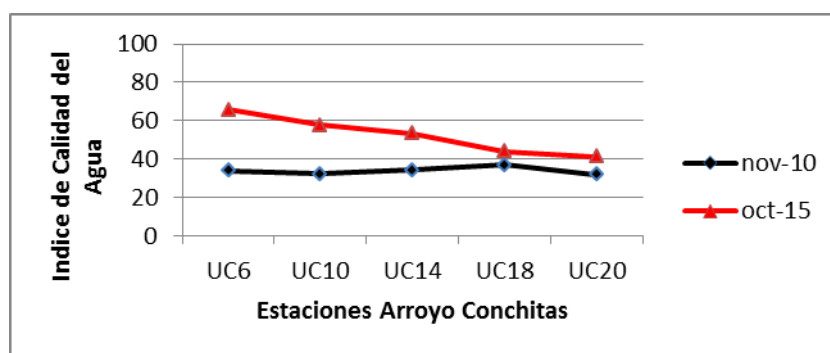


Figura 2. Resultados del INSF – 2010 y 2015

## CONCLUSIONES

Para ambos períodos, se observó una marcada vinculación entre los usos del suelo dominantes y la calidad del agua superficial. Respecto de los parámetros medidos, en el tramo superior los resultados obtenidos fueron acordes con la actividad rural dominante. Se registró un incremento significativo en el deterioro de la calidad del agua a partir de la

cuenca media donde se concentra la actividad industrial y la urbanización; los picos máximos así como los niveles críticos detectados correspondieron a parámetros vinculados con descargas cloacales e industriales.

Los bajos valores del INSF para el 2010 podrían estar asociados a condiciones anóxicas, ya que el oxígeno disuelto es el parámetro con mayor peso relativo en dicho índice; así como elevadas concentraciones de nitratos y coliformes fecales, entre otros.

Si bien se observó cierta tendencia a incremento del valor del INSF en el 2015, esto no significa que el cuerpo de agua esté mejor; para ello se requieren muestreos más frecuentes y estacionales.

A partir de los resultados obtenidos se reconoce la necesidad, por parte del estado, de incorporar medidas tendientes a controlar las actividades desarrolladas en la cuenca, así como establecer mecanismos tendientes a la planificación de los usos del suelo en el marco de la gestión integrada de cuencas. Se recomienda que se implementen planes de monitoreo que incluyan muestreos periódicos y sistemáticos del agua superficial y de sedimentos, en las estaciones de muestreo establecidas en este estudio, a fin de registrar la evolución de los parámetros medidos y su vinculación con los usos del suelo.

## **BIBLIOGRAFÍA**

AGOSBA – OSN – SIHN .1992. Río de la Plata. Calidad de las aguas FRANJA COSTERA SUR (San Isidro – Magdalena). Informe de Avance. 53 pp.

Brown, R., *et al.* (1970). *A Water Quality Index- Do We Dare?* Water and Sewage Works. pp. 339-343.

Carsen, A, Perdomo, A & Arriola, M. 2002. Contaminación de sedimentos del Río de la Plata y su frente marítimo. FREPLATA-Proyecto Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo: Prevención y Control de la Contaminación y Restauración de Hábitats. “Casa de los Ximénez”, Montevideo, Uruguay.

CCME .1999. Canadian Environmental Quality Guidelines. Niveles Guía de Calidad de Agua .Protección de Vida Acuática.

CCME .2002. Canadian Environmental Quality Guidelines. Niveles Guía de Calidad de Sedimento. Protección de Vida Acuática.

Comisión Económica de Naciones Unidas para Europa (CEPE). 1995. Protection and Sustainable Use of Waters: Recommendations to ECE Government. Water Series N°2. ECE/CEP/10, Comisión Económica para Europa, Naciones Unidas, Nueva York y Ginebra.

Cude, C. G. (2001). *Oregon Water Quality Index: a tool for evaluating water quality management effectiveness*. Journal of American Water Resources Association. Vol 37. N°1.

Dinius, S. H. (1987). *Design of an index of water quality*. Water Resources Bulletin Vol. 23, No. 5.

Dourojeanni A, Jouravlev, A & Chavez G. 2002. Gestión del agua a nivel cuencas: teoría y práctica. División de Recursos Naturales e Infraestructura. Serie 47. CEPAL, Naciones Unidas. Santiago de Chile. 83 pp.

Fernández Parada, N.J. y Solano Ortega, F. 2005. *Índices de calidad y de contaminación del Agua*. ISBN 958-33-7810-0. 142 pp. Capítulo III. Índices de calidad (ICAs) y de contaminación del agua (ICOs) de importancia mundial.

Pérez Flores L. S., Rodríguez Narváez, O. M., Gutiérrez Estrada R. del C. y Martínez Austria P. F. 2014. *Índices de calidad del agua: un comparativo entre México, Estados Unidos y la Unión Europea*. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, Puerto Vallarta, Jalisco, México.

Samboni Ruiz, N. E., Carvajal Escobar, Y. y Escobar, J. C. 2007. *Revisión de parámetros físicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua*. Revista Ingeniería e Investigación Vol. 27 No.3 (172-181).





# MECÁNICA



## ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ DE FISURA EN EXTREMO DE EJE Y ACOUPLE DE UN GENERADOR ELÉCTRICO DE ALTA POTENCIA

Bilmes, Pablo<sup>a</sup>; Llorente, Carlos<sup>a,b</sup>; Echarri, Juan Manuel<sup>a</sup>; Echarri, Tomás<sup>c</sup>; Martínez, Angel<sup>a</sup>; Zuzulich, José<sup>a</sup>; Saralegui, Gustavo<sup>c</sup>.

<sup>a</sup>Laboratorio de Investigaciones de Metalurgia Física (LIMF), Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata 1900, Argentina; <sup>c</sup>UIDET Ingeniería Aplicada en Mecánica y Electromecánica (IAME); <sup>b</sup>CICPBA- Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. Bs. As.

E-mail: [juanmanuel.echarri@ing.unlp.edu.ar](mailto:juanmanuel.echarri@ing.unlp.edu.ar)

**Palabras claves:** *Análisis de falla, fretting corrosion, fretting fatigue, fatiga torsional, rotor de generador.*

Se efectuó un análisis de falla y de causa raíz sobre el rotor de un generador eléctrico de alta potencia de combustible dual gas-gasoil, que presentó fisuración por fatiga torsional en su extremo (región de cambio de sección y acople), luego de 30.000 horas de servicio. El generador de 307 MW – 3000 rpm posee un rotor (eje de 400 mm Ø) fabricado en un acero grado propietario del tipo ASTM A470, *Class 7* de alta templabilidad. Las fallas por fatiga bajo un estado de cargas torsional de este tipo de componentes representan un 10 a un 25% de las roturas en los equipos rotativos y su estudio normalmente involucra aspectos relacionados del conjunto estructura-propiedades-procesamiento-desempeño de la ciencia e ingeniería de los materiales. A su vez el trabajo de relevamiento de antecedentes (diseño, fabricación, servicio, etc.) implica una convergencia en las áreas de conocimiento involucradas: análisis de fallas metalúrgicas, proyecto de máquinas y motores, mecanismos de daño en materiales, entre otros. Se reportó que el sistema de control del equipo manifestó en servicio un alto nivel de vibraciones no admisible para continuar con la operación. En primera instancia, y durante la parada del equipo para inspección, se detectó mediante inspección visual y ensayo de tintas penetrantes la presencia de fisuras oblicuas al eje del rotor. La región de la falla se corresponde con la zona de unión acople-eje unida mediante fijación por interferencia, mientras que la fisuración propagó sobre dos planos de fractura a 45° grados respecto del eje del rotor. Sobre esta zona adyacente al radio de acuerdo, donde se inició la fisuración, se evidenció un severo daño por *fretting corrosion*.

Una vez extraída la región fisurada del eje luego de la aplicación de diversos ensayos no destructivos (tintas penetrantes, ultrasonido *phased array*, etc.) se procedió a la apertura de las fisuras y a la caracterización e identificación de los mecanismos de daño presentes mediante análisis macrográficos, fractográficos, microscopía electrónica de barrido analítica, análisis químicos y ensayos mecánicos. Se reconoció que a partir del daño por *fretting corrosion*, se generaron microfisuras de fatiga que propagaron debido a las tensiones de servicio por un mecanismo de *fretting fatigue*. La propagación de las fisuras por fatiga en dos planos ortogonales y a 45° del eje longitudinal reveló una inversión en el estado de cargas, sólo justificable por vibraciones torsionales (la propagación principal alcanzó las tres cuartas partes del área de la sección transversal del eje, mientras que la fisura secundaria se desarrolló de forma incipiente a una profundidad no mayor a los 10

mm) que se adjudicaron a una resonancia torsional propia de la dinámica del sistema. A partir de estas últimas se consideró que se generaron los micromovimientos necesarios entre las partes del acople para la promoción de *fretting-corrosion* y a partir de este del *fretting fatigue* que produjo la fisuración por fatiga torsional de bajas tensiones nominales y alto número de ciclos.

## INTRODUCCIÓN

En materia de generación de energía eléctrica, y particularmente en generadores de alta potencia se ha trabajado en los últimos años en la producción de sistemas con mayor potencia de entrega. Los equipos de generación de alta potencia, sin embargo, tienen una limitación principal debido a la elevada inercia de los elementos de transmisión de movimiento que deberán ser cada vez más grandes. Los ejes de estos generadores operan bajo un rango amplio de condiciones de servicio, entre los que se encuentran atmósferas y temperaturas extremas. Así mismo estarán sujetos a una variedad de cargas que en general pueden resumirse a tensión, torsión, compresión, flexión o combinación de estas y a su vez en presencia de vibraciones [15,17] que serán de magnitud mayor en tanto más grande sea el componente rotante.

La presencia de vibraciones torsionales relacionadas a fluctuaciones en la red, o la falta de controles y sistemas de amortiguación en adición con sitios sensibles en el conjunto par eje-acople, que en presencia de una unión por interferencia derivan en la generación de daño superficial por *fretting*, son una causa estudiada de las fallas por fractura de los ejes de los generadores. La falla por fatiga se inicia en las regiones más vulnerables del componente donde se encuentran actuantes esfuerzos dinámicos, concentradores de tensión (que pueden ser de naturaleza mecánica o metalúrgica) o una combinación de ambos. Las tensiones elevadas por efecto de estos concentradores involucran elementos tales como filetes, radios de encuentro poco generosos, espinas o chaveteros, ajustes por interferencia defectuosos, mala terminación o rugosidad de maquinado, etc. Desde el punto de vista metalúrgico los concentradores de tensión se los define como fenómenos de fisuración por temple, corrosión localizada, inclusiones no metálicas de gran tamaño, partículas de segunda fase frágiles y defectos de soldadura [18].

Desde 1970 en adelante se han detectado diversas fallas frecuentemente localizadas en la región del acople asociadas a una fractura por fatiga iniciada con un daño superficial por *fretting* que, a su vez, en la mayoría de los casos acusaron la presencia de vibraciones torsionales (ver figura 1).

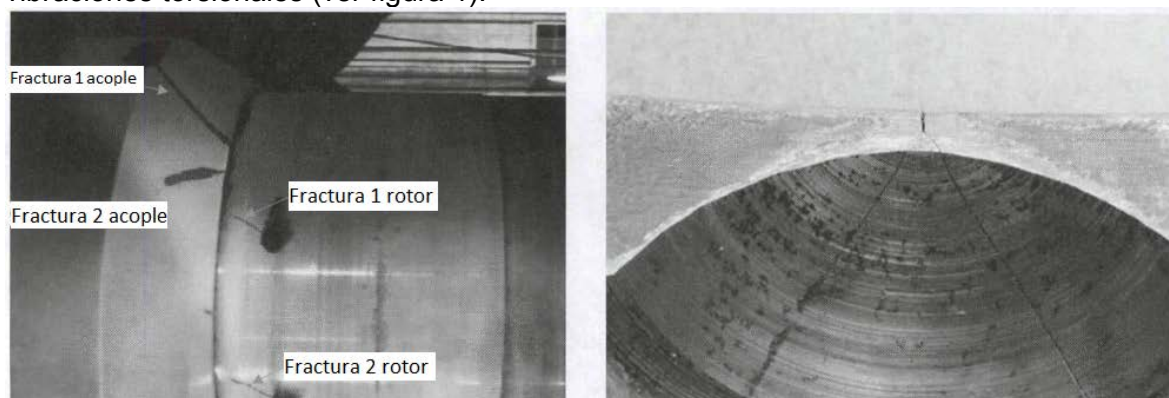


Figura 1. Falla por fractura por fatiga en un eje y acople de generador de energía., “*Coupled torsional vibration and fatigue damage of Turbine Generator Due to Gird Disturbance*”. Chao Liu y Col. Beijing, China. 2014.

La literatura vuelca una extensa revisión de casos de falla tanto para ejes de generadores de alta como de baja potencia, el punto en común en la mayoría de los casos es la existencia de una fractura por fatiga iniciada por *fretting* (en algunos casos asistido por corrosión) en donde se expone la debilidad en regiones del eje donde existen cambios de sección y juntas de tipo estacionaria con ajuste por interferencia. En la figura 2 se muestra la inspección visual de un caso de falla de un eje de un generador diésel con el plano de fractura por fatiga desarrollado en más del 70% de su sección hasta la rotura catastrófica del ligamento remanente, en la imagen de la izquierda se aprecia a su vez (indicado en verde) el inicio de la fractura. El plano de propagación de la fractura está relacionado con la presencia de esfuerzos de torsión con una disposición de  $45^\circ$  respecto al eje del elemento [14]. Una forma menos frecuente pero estudiada es la fractura por fatiga en presencia de cargas torsionales con inversión en el sentido de giro o aplicación de la carga. Cuando la carga cambia de dirección se forman dos fracturas a  $45^\circ$  respecto a la dirección longitudinal del eje [20]. La figura 3 muestra un eje con una fractura por fatiga torsional con inversión en el sentido de giro iniciada en las marcas circunferenciales (daño por *fretting*) [19]. Siempre que exista este tipo de patrón, y el elemento no tenga asignado en servicio una inversión de cargas, se está en presencia de vibraciones torsionales [18,20].



Figura 2. Eje del generador y acople con evidencia de una fractura por fatiga torsional. Craighead, I.A. and Gray, T.G.F. (2004) Investigation of diesel generator shaft and bearing failures.

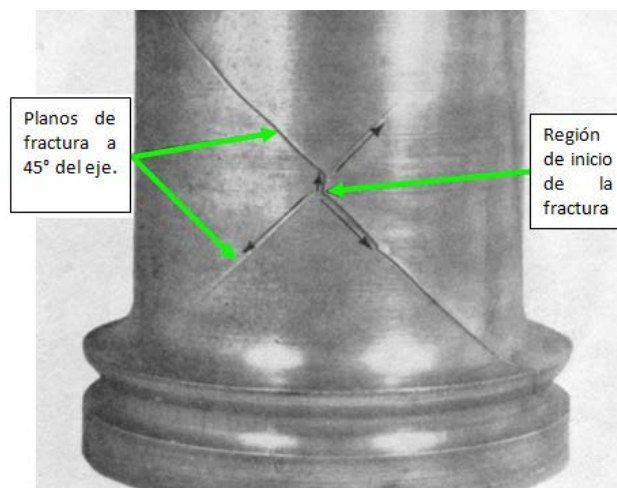


Figura 3. Fractura en X (patrón estrella) debido a la presencia de inversión de cargas torsionales. "Fatigue Failures, With Special Reference to Fracture Characteristics", G. A. Cottell, M.Sc., A.I.M. 2004 ASM International.

El presente trabajo está basado en el Análisis de Causa Raíz de fisuración de un extremo del eje de un generador de 307 MW – 3000 rpm por un mecanismo de fretting-fatiga con un estado de cargas de vibraciones torsionales.

## DESARROLLO Y ESTUDIOS REALIZADOS

Se realizaron las siguientes acciones y estudios:

- Análisis macrográficos y fractográficos en parte y contraparte desgastadas y fisuradas (junta eje-acople).
- Análisis metalográfico para revelar limpieza inclusionaria del acero, microestructura y durezas del eje y del acople.

- Análisis químico del acero del eje y del acople mediante espectrómetro de emisión óptica.
- Ensayos mecánicos de tracción e impacto sobre el material del eje.

### Inspección del desarrollo de la fisura

Una vez definido mediante END el desarrollo de la fisura, se procedió al corte axial del eje para luego exponer la superficie de fractura. En la figura 4 se aprecia tanto en el eje como en el acople el patrón de fractura donde la flecha verde señala el plano principal de propagación tanto en el eje como en el acople. En estas zonas se evidencia un severo daño por *fretting corrosion*, el cual tiene las mismas características topográficas de daño en parte y contraparte de lo que fue la junta estacionaria ajustada con interferencia. Se aprecia tanto en parte y contraparte (eje y acople) la presencia de un plano principal de propagación de fractura a 45° del eje longitudinal del elemento y, a su vez, un plano de desarrollo incipiente de fractura por fatiga ortogonal al principal característico de un estado de cargas con esfuerzos torsionales reversibles.

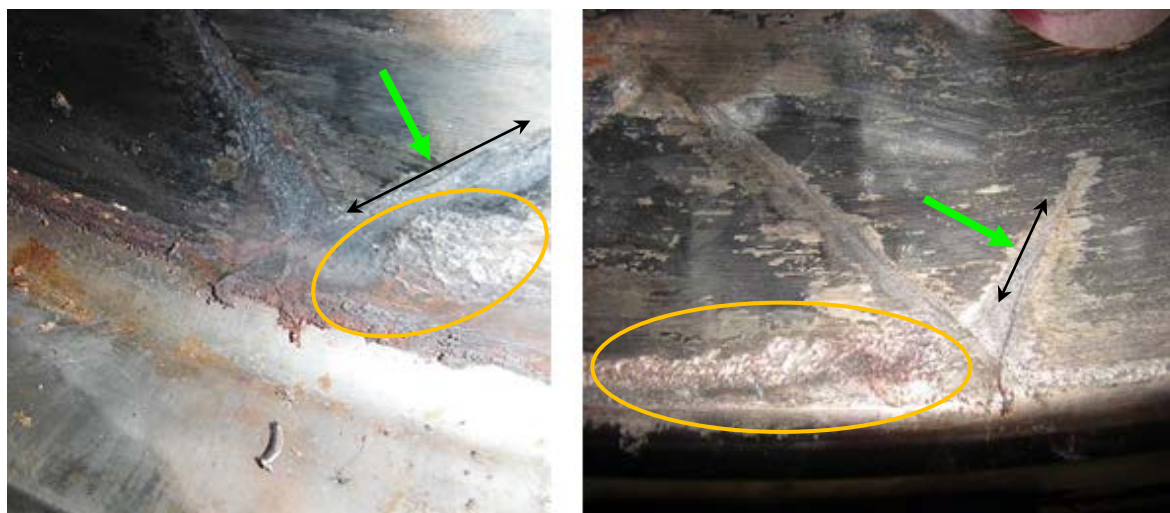


Figura 4. Fisuración del eje (izq.) y del acople (der.) antes de la apertura de las superficies de fractura. Las fisuras se señalan con flechas verdes (con el plano de fractura principal señalado en negro) y el daño por *fretting* se encuentra contorneado en naranja.

### Fractografía

En la figura 5 se muestra cómo la apertura de la fisura expuso la fractura con el patrón característico de una propagación por fatiga, donde las *Ratchet Marks* son señaladas junto con las *Beach Marks* en verde y el origen de la fractura se delimita en naranja. A la derecha se muestra ampliada (vía SEM) la región de origen de la fractura donde se puede apreciar un severo daño por *fretting* (superficie del eje) y por otro lado las marcas de avance del plano de fractura concéntricas en el inicio de la falla.



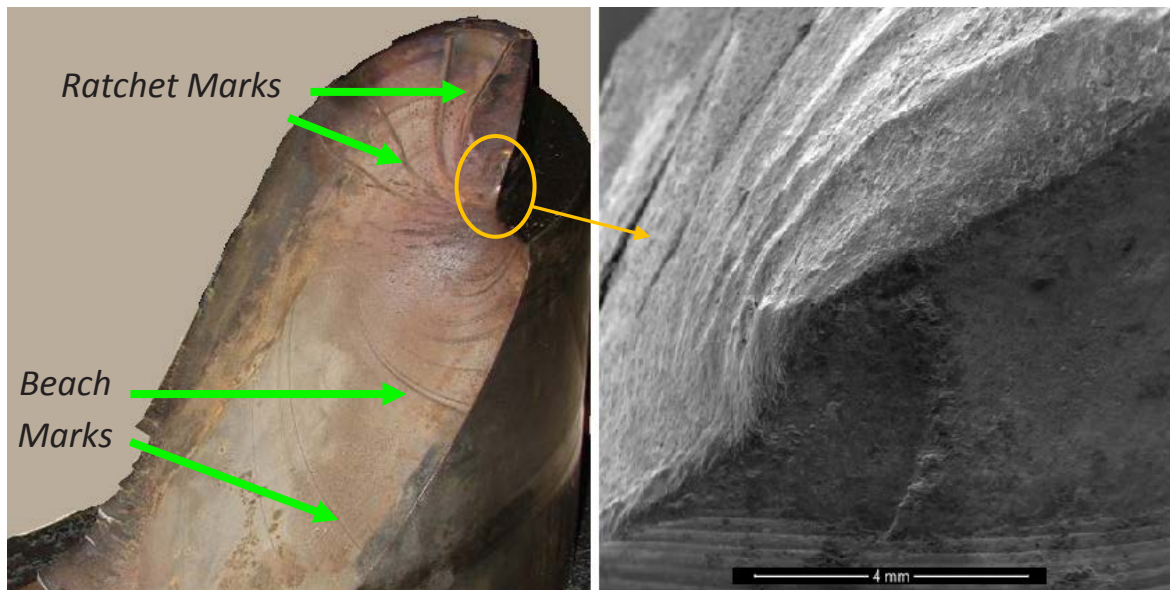


Figura 5. Izq: Superficie de fractura del eje donde aprecia el patrón de fractura por fatiga. Y se señala el inicio de la fractura en naranja. Der: Imagen SEM donde se aprecia la región de origen de fractura.

### Daño por *fretting*

En la figura 6 se observa una sección de eje que presenta daño por *fretting*, en la imagen de la derecha se pueden observar vía SEM las marcas de mecanizado y la deformación producto de los micro-movimientos presentes en la junta estacionaria, a la vez que una fisura (señalada en verde) atraviesa la imagen desde la región con *fretting* hacia la zona donde aún subsiste la rugosidad del mecanizado.

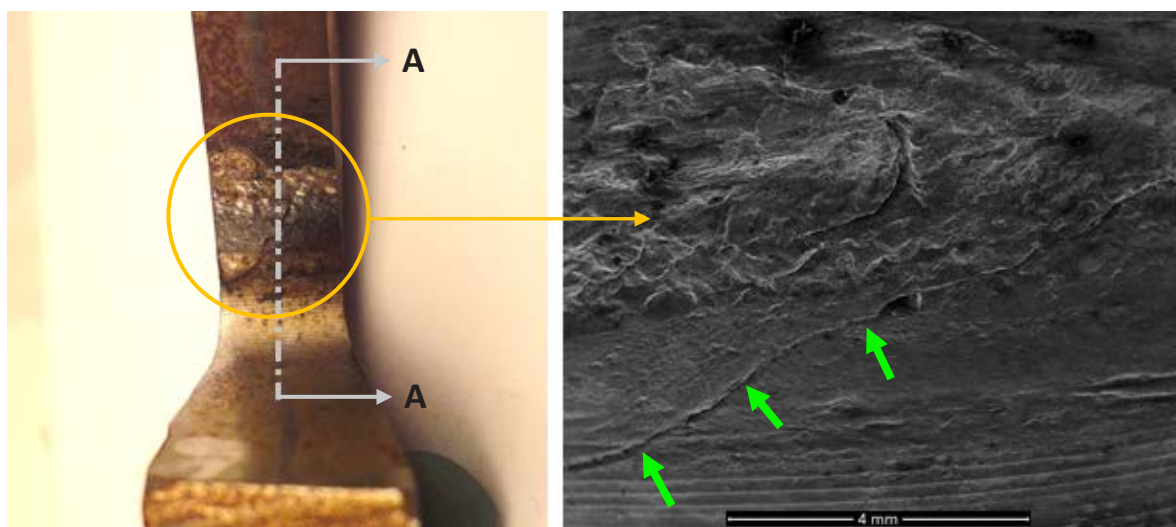


Figura 6. Visualización de la superficie afectada por *fretting* vía SEM. En la imagen de la derecha se pueden observar las marcas de maquinado y la deformación En la imagen de la izquierda se señala el corte realizado para la vista transversal del daño por *fretting*.

Asimismo en la figura 6 se visualiza el corte A-A que será presentado como micrografía transversal al daño por *fretting* visualizándose severas alteraciones (figura 7), en las

cuales se observan deformaciones que con una profundidad del orden de los 200  $\mu\text{m}$ , intrusiones de partículas de desgaste “debris” correspondientes al acero del eje y del acople, juntamente con óxidos y posiblemente restos de lubricante.

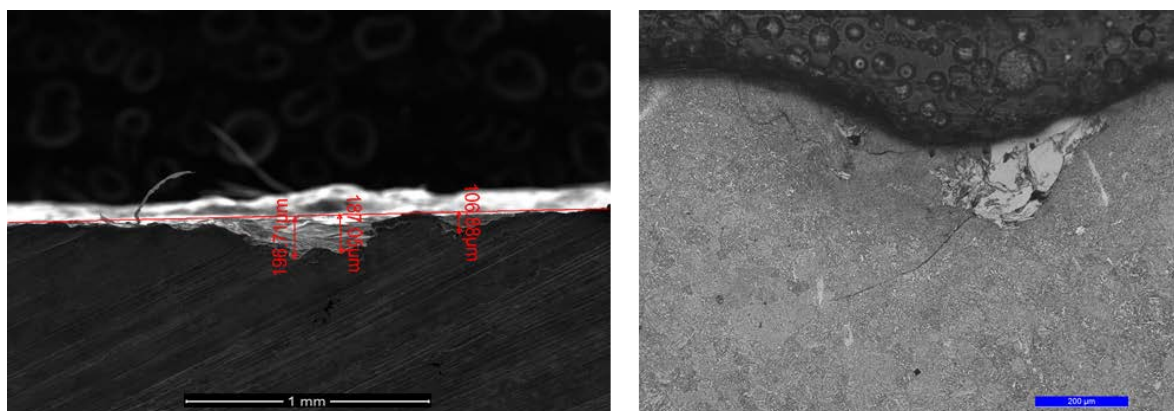


Figura 7. Vista del corte en sección A-A señalada en la figura 6. El daño por fretting se evidencia con una profundidad del orden de las 2 décimas de milímetro. La micrografía de la imagen derecha muestra la presencia de metal de la contraparte así como un severo daño por deformación.

### Análisis químico

En tabla 1 se presenta la composición química del acero del eje y del acople. El material del eje es un acero grado propietario del tipo ASTM A470, *Class 7* equivalente a EN SEW 555 26NiCrMoV14-5 / SEW 555 26NiCrMoV11-5, 1.6957 / 1.6948.

Por otro lado el acero del acople se corresponde con un acero del tipo AISI 4340 equivalente a DIN 1.6562, 40NiCrMo7-3.

Tabla 1: Composición química del acero del eje y del acople

	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)	Al (%)
Eje	0,25	0,09	0,20	1,70	3,93	0,34	0,0128	0,0015	0,036	0,044
Acople	0,42	0,12	0,61	0,80	1,81	0,24	0,0111	0,0058	0,119	0,008

### Microestructura y propiedades mecánicas

El acero del eje presenta una fina microestructura de martensita revenida con una dureza promedio de 320 HV<sub>10</sub>. Su limpieza inclusionaria es muy buena. Mientras que el acero del acople presenta una fina microestructura de martensita revenida con una dureza promedio del 279 HV<sub>10</sub>. Estas características del material son las adecuadas para este tipo de aplicación y servicio (ver tabla 2).

Tabla 2: Propiedades mecánicas del acero del eje (ASTM E8).

	Tensión de rotura (MPa)	Tensión de fluencia (MPa)	Alargamiento (%)	Charpy (J) (ASTM E23)
Promedio	908	788	19,86	158



## DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y MODELO DE DAÑO

En general el fenómeno de desgaste por *fretting* se da como mecanismo de daño en dos superficies en contacto bajo presión y ajuste estacionario (con o sin interferencia) con la presencia de cargas cíclicas o movimientos relativos de extremadamente baja amplitud con alta localización de deformación por corte (se producen microsoldaduras, entre dos superficies que no se desplazan relativamente entre sí, aunque pueden vibrar y microdeslizarse, y por ende soldarse, desgarrarse y microdesgastarse) [16]. Estos rasgos propios del mecanismo de daño han sido denominador común en los trabajos de revisión y casos emblemáticos abordados por la literatura [7,14,18,19]. A su vez el desgaste adhesivo se puede identificar por cambios generados a nivel superficial de los materiales en contacto (Fig. 7); pudiendo promover una disminución de dureza (por revenido) o la fragilidad del material con la aparición de microfisuras que podrían crecer por fatiga (el *fretting* corrosión no sólo anula el límite de fatiga del material sino que baja su desempeño a esta sollicitación).

El efecto más pernicioso del daño por *fretting corrosion* es que puede conducir a *fretting Fatigue* (fracturas por fatiga debido a *fretting*). En el caso de ejes las mismas pueden ser de tipo flexional, torsional o combinadas. Las fracturas de fatiga torsional están típicamente orientadas a 45 grados respecto a la dirección axial, mientras que las flexionales a 90 grados. Si hay dos planos de fractura a 45 grados en un eje cuya carga nominal no cambia de dirección (el caso bajo estudio), esto es un indicador de vibraciones torsionales (Fig. 4 y 5).

Las vibraciones torsionales son oscilaciones en la deformación angular de un rotor a lo largo del su eje. En general la dinámica del rotor es la superposición de la respuesta libre (ausencia de excitación) a una condición inicial y la respuesta forzada a una excitación externa. En el primer caso la oscilación es periódica y decae con el tiempo debido a la disipación. En el último la oscilación es una transformada de la fuente de excitación y se presenta la amplificación dinámica de la deformación (resonancia) si el espectro de excitación contiene frecuencias próximas a las naturales del sistema y realiza trabajo sobre los modos de deformación asociados a éstas.

En sistemas lineales amortiguados, si la fuente de excitación es de carácter periódico entonces la respuesta también lo será. Las causas de torques periódicos reportadas en la literatura [10,11] son:

- Fenómenos periódicos en el escurrimiento fluido.
- Desalineamiento, provoca una excitación sincrónica (1X) y armónicos (fundamentalmente 2X).
- Acoplamiento flexo-torsional.

Un mecanismo de acoplamiento flexo-torsional se origina en el torque requerido para igualar la variación de la cantidad de movimiento angular provocada por trayectorias no circulares del centro geométrico de cualquier sección del rotor (orbitas). Otra forma de acoplamiento se presenta en rotores con simetrías menores que la axial sometidos a fuerzas radiales, a raíz de la variación del torque necesaria para atravesar los planos de simetría con el rotor flexionado. Dada la naturaleza no lineal del acoplamiento provoca una excitación sincrónica (1X) y armónicos (2X, 3X, etc.).

Las fuentes de excitación aperiódicas pueden concebirse como una distribución de excitaciones impulsivas en el tiempo y la respuesta es la superposición de las oscilaciones libres correspondientes. Las causas de torques impulsivos reportadas en la literatura [10,11] son:

- Sincronización deficiente y cambios de carga súbitos en la red.
- Arranque, parada y pruebas.
- Contacto rotor-estator.
- 

Una situación de importancia, no contemplada en los casos anteriores, es la respuesta auto excitada. Esta ocurre cuando una excitación estática provoca la interacción oscilatoria entre componentes de la máquina, modificando las características dinámicas del sistema. En particular el fenómeno de adherencia-deslizamiento (*stick-slip*) provocado por el micro-deslizamiento en acoples o la actuación de frenos puede provocar un espectro compuesto por la frecuencia fundamental del deslizamiento relativo, armónicos y sub-armónicos.

Es importante destacar que a diferencia de las vibraciones de flexión (o laterales), las cuales transfieren energía a los soportes, las vibraciones torsionales se amortiguan básicamente a través de la disipación interna del material y debido a la presencia de acoples mecánicos. En consecuencia el amortiguamiento modal en torsión es de un orden de magnitud menor que en flexión [11], ocasionando que la respuesta transitoria se atenúe más lentamente, permitiendo la superposición de modos flexión-torsión oscilatorios por un lapso prolongado, y amplificando las oscilaciones en régimen estacionario.

## CONCLUSIONES

- La fisuración del eje es típica de una fractura por fatiga torsional de bajas tensiones nominales y alto número de ciclos (la zona de propagación de fatiga con *Beach Marks* ocupa una superficie de más de 300 mm de extensión), desarrollada desde el radio de acuerdo del eje. La fisuración propagó sobre dos planos de fractura a 45 grados respecto de la línea central del eje.
- Se asume que a partir del daño por *fretting corrosion* y en el radio de acuerdo del eje; la concentración de tensiones allí producida fue suficiente para promover microfisuras de fatiga que propagaron debido a las tensiones de servicio (por un mecanismo de *fretting fatigue* ocasionado por *fretting corrosion*).
- La prevención o mitigación del *fretting* se logra eliminando o reduciendo las vibraciones, los microdeslizamientos (aumentando la presión de contacto o el ajuste entre las partes siempre y cuando se asegure con ello la inmovilidad), introduciendo tensiones residuales compresivas en ambas superficies en contacto, incrementando las durezas superficiales por tratamientos termoquímicos de endurecimiento (nitruración, etc.), y utilizando lubricantes *antifretting*.

## REFERENCIAS

- [1] *Failure Analysis and Prevention*, ASM Handbook, Volume 11, 2002, ASM International.  
[2] C. Chin, "Torsional fatigue of turbine-generator shafts owing to network faults". IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib, Vol. 143, No -5, 1996.

- [3] Chao Liu, “*Coupled Torsional Vibration and Fatigue Damage of Turbine Generator Due to Grid Disturbance*”. ASME, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol.136/062501-1, 2014.
- [4] Craighead, I.A. and Gray, T.G.F. (2004) “*Investigation of diesel generator shaft and bearing failures*”. *Journal of Multi-Body Dynamics, Proceedings of the IMechE, Part K*, 218 (3). pp. 153-158. ISSN 1464-4193.
- [5] Thoma Brown, “*Torsional Fatigue Failures, Identification, Diagnosis and Prevention*”, *UpTime Mag*, oct/nov 2014.
- [6] G. A. Cottell, M.Sc., A.I.M. “*Fatigue Failures, With Special Reference to Fracture Characteristics*”. *The British Engine Technical Reports, F.R. Hutchings and P.M. Unterweiser, Ed., American Society for Metals*, 1981.
- [7] M. Zamanzadeh, “*A Re-Examination of Failure Analysis and Root Cause Determination*”. Matco Associates, Pittsburgh, Pennsylvania, 2004.
- [8] *Fatigue and Fracture*, ASM Handbook, Volume 19, ASM International.
- [9] *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics*, F. C. Campbell, 2012 ASM International.
- [10] *Rotordynamics*, A. Muszynska, 2005 CRC Press.
- [11] *Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics*, D. E. Bently et al, Bently Pressurised Bearing Press.

## ANÁLISIS DE FALLA POR CORROSIÓN-FATIGA DE UN TUBO DE PRODUCCIÓN DE UN POZO DE PETRÓLEO

Bilmes, Pablo<sup>a</sup>, Llorente, Carlos<sup>a,b</sup>; Echarri, Juan Manuel<sup>a</sup>;  
Martinez, Angel<sup>a</sup>; Zuzulich, José<sup>a</sup>.

<sup>a</sup>Laboratorio de Investigaciones de Metalurgia Física (LIMF), Facultad de Ingeniería  
UNLP, La Plata 1900, Argentina.

<sup>b</sup>CICPBA- Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. Bs. As.  
E-mail: [juanmanuel.echarri@ing.unlp.edu.ar](mailto:juanmanuel.echarri@ing.unlp.edu.ar)

**Palabras claves:** *análisis de fallas, corrosión carbónica, corrosión sulfhídrica, fatiga, tubing.*

Se efectuó el análisis de falla de un tubo de 2 7/8" de diámetro de acero al carbono API 5CT J55 de una tubería de producción de petróleo, que fracturó en servicio en su extremo roscado donde presentaba corrosión interna. Las fallas en tuberías de producción y conducción de petróleo y gas generan un daño directo en el medio ambiente y en el aprovechamiento de los recursos, por lo cual un correcto análisis de falla y de causa raíz es vital para comprender los mecanismos de daños actuantes y prevenirlos, detectar y corregir vicios ocultos y redefinir parámetros de diseño, operación, inspección y mantenimiento. Los fluidos corrosivos más agresivos en la industria del petróleo y el gas son aquellos que contienen gases disueltos en solución acuosa del tipo H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, con altas concentraciones de cloruros. En estos casos hay muchas variables que determinan cuando y como procede la corrosión y otros mecanismos de daño asistidos, entre ellas las concentraciones de dichos gases y cloruros, pH, temperatura, régimen de flujo; composición, microestructura y dureza del acero; aplicación de inhibidores, etc. En este campo de la ingeniería el control de la corrosión se realiza básicamente a través de tecnología de recubrimientos, aleaciones resistentes a la corrosión e inhibidores de corrosión en el caso de aceros al carbono. La caracterización del material y de los daños en el *tubing* se efectuó mediante análisis químicos, macrográficos, fractográficos, metalográficos por microscopía óptica y ensayos de tracción. Los productos de corrosión fueron analizados mediante microscopía electrónica de barrido analítica y difracción de rayos x. El análisis fractográfico y del interior del tubo reveló una severa corrosión en la superficie interna desde donde se iniciaron frentes de fractura por fatiga por flexión. Así, en una región de aproximadamente 180° de la sección del tubo se desarrolló inicialmente un daño por corrosión-fatiga desde la superficie interior, y luego de que la sección metálica resistente disminuyera en aproximadamente un 50% ocurrió una fractura por sobrecarga de tipo dúctil. Se discuten los resultados de los análisis de los productos de corrosión internos, su asociación con los mecanismos de corrosión y fatiga que fueron operativos y la efectividad de los productos y procedimientos de inhibición de corrosión utilizados en el pozo.

### INTRODUCCIÓN

El conjunto principal de elementos de conducción de petróleo-gas, productos de extracción y agentes de transporte se los denomina de forma genérica Tuberías de Producción o frecuentemente adoptado el término sin traducción "*Tubing*" de Producción de Petróleo-Gas. El tubo tiene que soportar la corrosión de cualquier fase acuosa producida con hidrocarburos y que contiene gases ácidos disueltos (como CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S) y sales (que generan altas concentraciones de iones cloruro). El análisis de los mecanismos

de daño es clave en el desarrollo de medidas preventivas y correctivas sobre el control de la corrosión en la producción de gas y petróleo [1]. Dicho control es esencial para mantener la producción y evitar el riesgo de pérdida del control del pozo a la vez que el constante desarrollo de aleaciones, recubrimientos e inhibidores para mitigar las fallas en el sector, así como las investigaciones en el área del control de los procesos de degradación son una fuente valorable de conocimiento y formación académica como parte importante del conjunto estructura-propiedades-procesamiento-desempeño en la ciencia e ingeniería de los materiales.

La mayor parte del volumen de producción de tubos para *tubing* es en aceros de baja aleación de acuerdo con la especificación API 5CT. Para que ocurra corrosión durante el transporte de fluidos en las distintas etapas de producción debe existir un medio acuoso en contacto con la superficie metálica. En muchos casos, en general en pozos de extracción convencional de petróleo, no es probable la existencia de un medio acuoso en contacto con la superficie del acero y por lo tanto no se producirá corrosión. De hecho, en los "primeros días" del petróleo donde el costo de extracción era relativamente bajo, los pozos se cerraban una vez que el contenido de agua excedía cierto porcentaje del fluido, por lo que la corrosión era raramente el factor limitante en la vida del *tubing*. En los pozos de gas es el fenómeno de condensación, cuya ocurrencia depende de la humedad presente en el fluido, del punto de rocío y del perfil de temperaturas de la tubería, el que define (junto con los factores metalúrgicos, presencia de recubrimientos e inhibidores) la probabilidad de ocurrencia del proceso de corrosión. En los casos en los que existe una mezcla de fases líquidas petróleo/agua, ambas fases se encontrarán formando una emulsión y no se observarán fenómenos de corrosión siempre que la relación de contenido del fluido permita la formación de una capa estable y continua de productos oleosos sobre la superficie del *tubing*. La realidad hoy día indica que los pozos se encuentran en un estadio de vida donde el proceso de corrosión es factor de diseño a lo largo de la línea de extracción y transporte [1,2].

Los aceros al carbono son materiales utilizados comúnmente en tuberías de producción de petróleo y gas, moderadamente resistentes a CO<sub>2</sub> como gas disuelto en el fluido transportado. La especificación API 5CT introduce una variedad de aceros al carbono para *tubing* donde, no obstante su aceptable desempeño, en los últimos años debido al incremento de la relación agua/petróleo o humedad del gas transportado y aumento de concentración de gases disueltos, los fenómenos de corrosión ocurren cada vez con más frecuencia localizándose principalmente en la región de las uniones roscadas. Los regímenes de flujo con altas concentraciones de H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup>, son los más frecuentes y corrosivos en la industria petrolera [3]. Hay un conjunto de variables asociadas a la corrosión por CO<sub>2</sub> disuelto, entre las que se destacan pH, temperatura, presión, régimen de flujo, composición del acero, inhibidores, sales disueltas, naturaleza de películas superficiales, etc. [4].

El presente trabajo se construyó a partir de una revisión de distintos casos de estudio de los mecanismos de daño actuantes y del procedimiento experimental elegido para identificar, en el presente análisis de falla, los elementos claves necesarios para hallar la causa raíz y proponer acciones tendientes a evitar la ocurrencia del fenómeno a futuro. Teniendo en cuenta que las soluciones generales a los problemas de corrosión por gases y sales disueltas buscan atacar la problemática desde el punto de vista de la metalurgia y/o desde el empleo de inhibidores del proceso de corrosión.



## DESARROLLO Y ESTUDIOS REALIZADOS

Sobre el material de *tubing* se realizaron las siguientes acciones y estudios:

- Análisis macrográficos y fractográficos de la superficie de fractura (parte y contraparte) del *tubing*.
- Análisis fractográfico y de los daños mediante SEM, y microanálisis de los productos de corrosión mediante EDS y difracción de Rx.
- Ensayos mecánicos de tracción.
- Análisis químico del acero del *tubing* mediante espectrómetro de emisión óptica.
- Extracción de muestras metalográficas en zona próxima a la fractura y de una región alejada.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis químico

En tabla 1 se presenta la composición química del acero del *tubing* en % en peso. De acuerdo a los resultados del análisis químico y lo informado por la empresa, el acero del *tubing* es del tipo J55, API Specification 5CT / ISO 11960.

Tabla 1. Composición química mediante espectroscopia de emisión óptica.

Elementos	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Cu
Wt%	0,18	0,31	1,19	0,043	0,011	0,014	0,020	0,001	0,026

### Microestructura y propiedades mecánicas del acero del *tubing*

En Tabla 2 se presentan las propiedades mecánicas del acero del *tubing* obtenidas en el ensayo de tracción. Dicho acero tiene una resistencia a la tracción por arriba del mínimo especificado por norma. Asimismo, la tensión de fluencia se ubica entre el mínimo y el máximo especificado para el grado J55, según lo indicado por la norma API Specification 5CT/ISO 11960. El acero presenta una microestructura uniforme ferrítico-perlítica, normal para este grado y uso, con una dureza promedio de 190 Hv (Figura 1).

Tabla 2. Propiedades mecánicas promedio, a tracción, de tres probetas ensayadas.

Propiedad	Tensión de rotura (MPa)	Tensión de fluencia (MPa)	Alargamiento (%)
<b>Promedio</b>	<b>662</b>	<b>407</b>	<b>20,7</b>

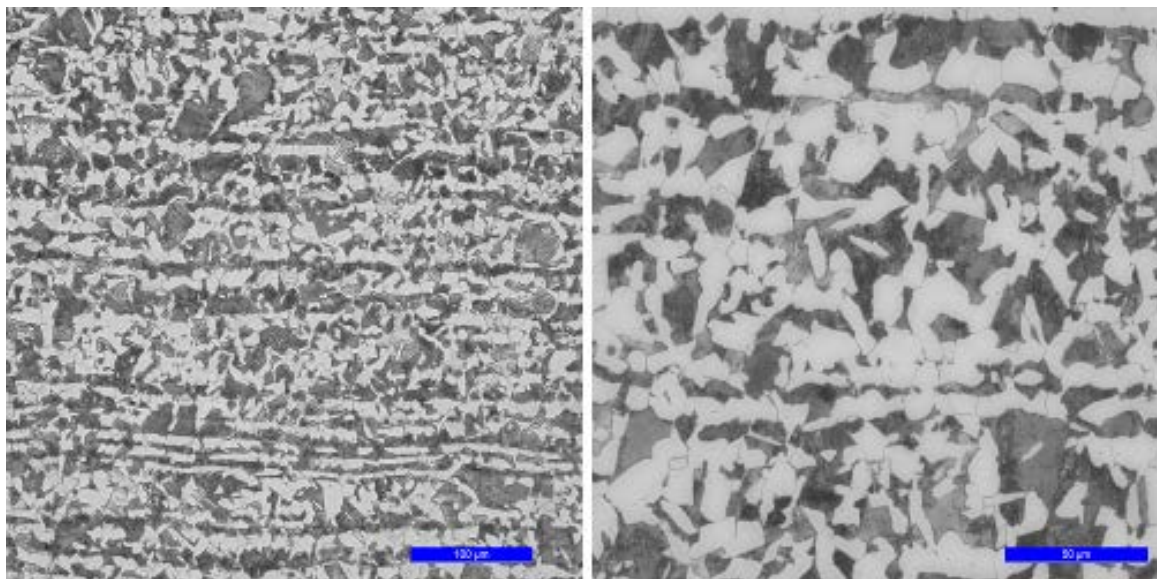


Figura 1. Microestructura ferrítico-perlítica con banding de segregación usual para este grado

### **Análisis macrográficos, fractográficos y microanálisis.**

En figura.2 se muestra el *tubing* fracturado en la proximidad de su extremo de recalque roscado.



Figura 2. Extremo del tubing donde se produjo la fractura. Se aprecia una estricción del tubo en la región de fractura.

La Figura 3 muestran la superficie de fractura (sin y con decapado, en imagen izquierda y derecha respectivamente). El análisis de la superficie de fractura y el interior del tubo revelan una severa corrosión en la superficie interna desde donde varios pits de corrosión asistieron a la iniciación de los frentes de fractura por fatiga. Así, en una región de aproximadamente 180° se desarrolló inicialmente un daño por corrosión-fatiga desde la superficie interior, y luego de que la sección metálica resistente disminuyó en aproximadamente un 50%, ocurrió la fractura por sobrecarga de tipo dúctil con labios de corte.

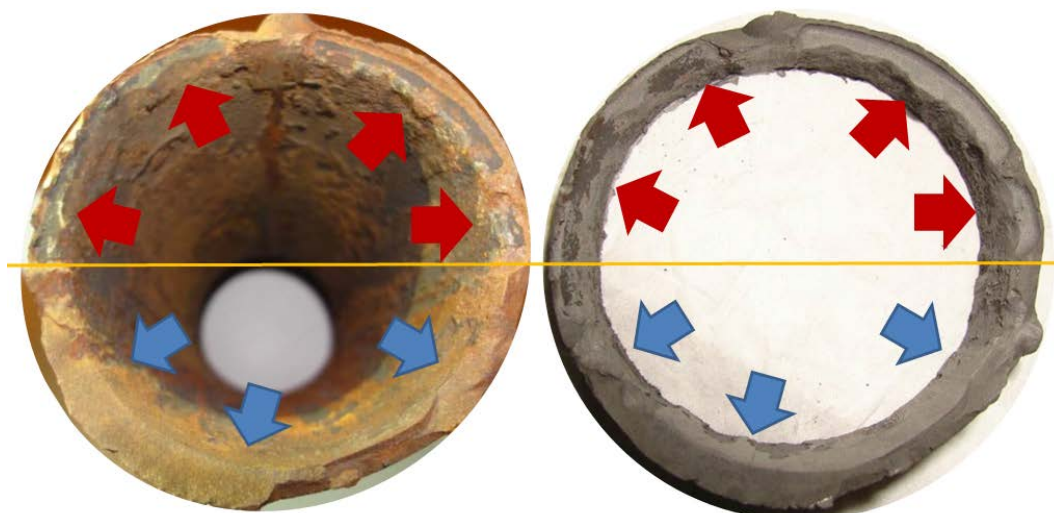


Figura 3. Izquierda sin decapar y derecha con decapado. Se visualizan pits de corrosión internos y distintos frentes de avance de fractura por fatiga (señalados en rojo) que llegaron a abarcar el 50% de la sección del tubo hasta la rotura dúctil con labios de corte, por sobrecarga (señalados en azul).

La Figura 4 muestra los análisis SEM-EDS y DRX de los productos de corrosión. Los análisis de los productos de corrosión internos detectaron la presencia de Siderita (carbonato de hierro) y de Sulfuro de Hierro; por lo cual puede inferirse que la corrosión fue producida por  $\text{SH}_2$  y  $\text{CO}_2$  en solución acuosa [3].

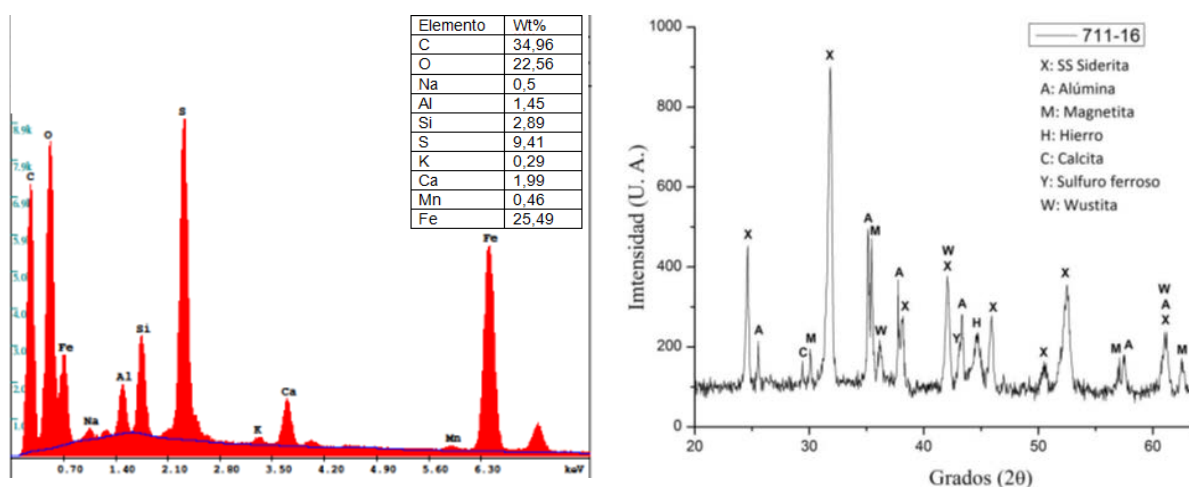


Figura 4. **Izq:** Análisis mediante EDS de los productos de corrosión internos. **Der:** Análisis por difracción de rayos-x de los productos de corrosión internos.

Las Figuras. 5 (A, B y C) son vistas de la superficie de fractura luego de un suave decapado para análisis fractográfico macro y por microscopía electrónica de barrido. Se hacen evidentes signos de fisuración por fatiga a partir de pits de corrosión internos (señalados en la figura 5 A, en naranja), con marcas tipo *Beach Marks* de propagación de fatiga circulares y estrías de fatiga (figuras 5 B y C señalados en verde).



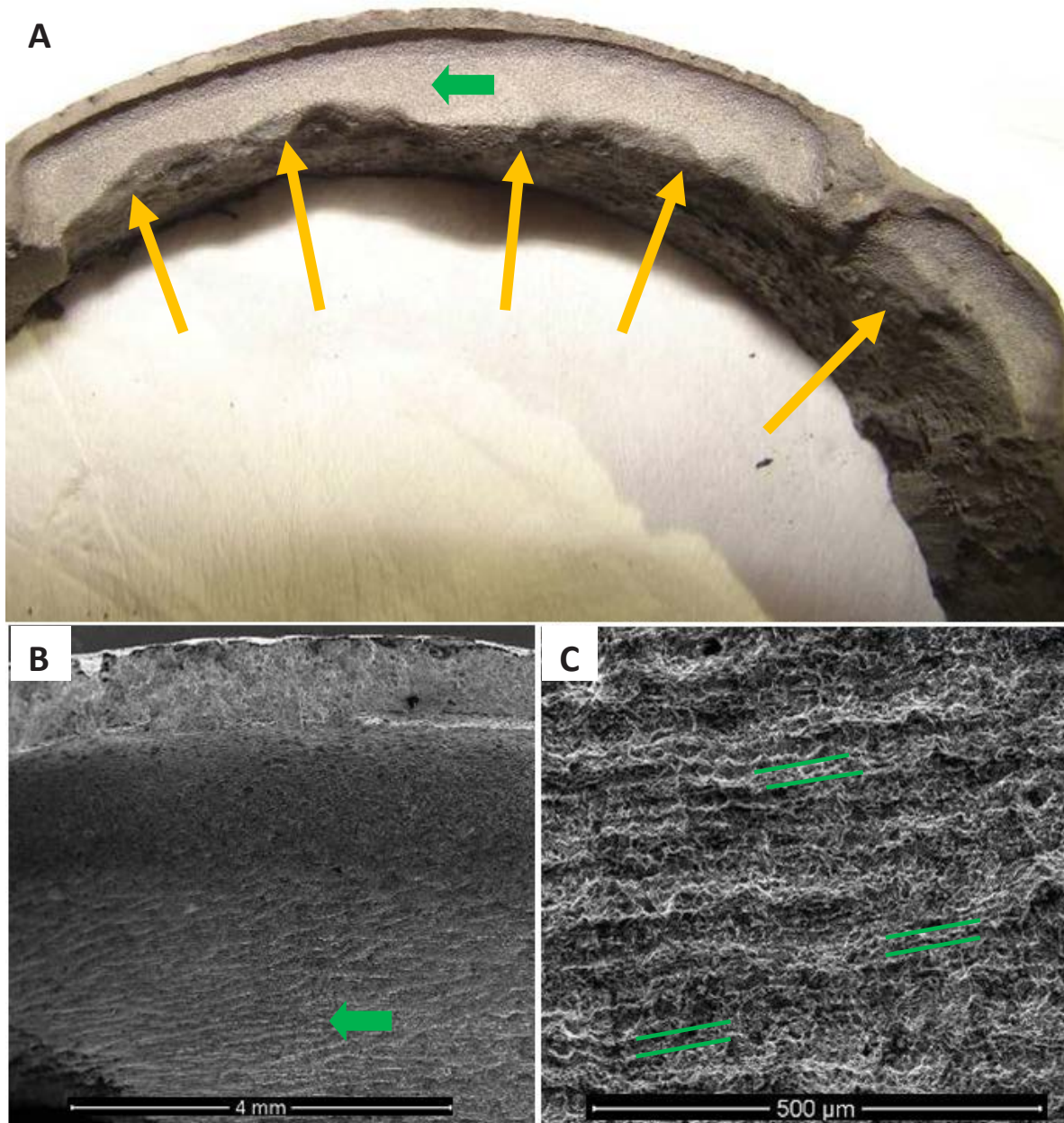


Figura 5. En la imagen A se observa la superficie de fractura luego de un suave decajado para análisis fractográfico macro donde se evidencian signos severos de corrosión interna y el inicio de los frentes de fractura por fatiga, en la imagen B se aprecian las *Beach Marks* características de estos mecanismos de daño junto con las estrías observables a mayores aumentos (imagen C).

### CONCLUSIONES

El análisis de la superficie de fractura y el interior del tubo revelan una severa corrosión en la superficie interna favoreciendo un proceso de corrosión-fatiga hasta abarcar un 50% de la sección del tubo, sobreviniendo la fractura por sobrecarga de tipo dúctil con labios de corte. Se detectó vía XRD la presencia de Siderita (carbonato de hierro) y de Sulfuro de Hierro; por lo cual puede inferirse que la corrosión fue producida por  $\text{SH}_2$  y  $\text{CO}_2$  en solución acuosa. En base a la evidencia se puede afirmar que la falla tiene origen en un

daño primario por corrosión sulfhídrica y carbónica en el interior del *tubing*, que fue asistido posteriormente por fisuración por fatiga.

Se recomienda verificar las concentraciones de gases disueltos en el fluido por interior del *tubing* y la efectividad de los procedimientos (y productos) de inhibición de corrosión utilizados.

## REFERENCIAS

- [1] L. Smith, “*Control of corrosion in oil and gas production tubing*”, Cirencester, UK, 1998.
- [2] Corrosion in the Oil Industry – Schlumberger, Report, D Brondel, 1987.
- [3] Lopez, D.A., Simison, S.N., de Sanchez, S.R.: “*Inhibitors performance in CO2 corrosion EIS studies on the interaction between their molecular structure and steel microstructure*”. Corros. Sci. 47, 735–755 (2005).
- [4] Javidi M., “*Failure Analysis of a Gas Well Tubing due to Corrosion: A Case Study*”, ASM International, 2012.
- [5] API Specification 5CT A4ISO 11960:2004, *Petroleum and natural gas industries—Steel pipes for use as casing or tubing for wells*.
- [6] *Failure Analysis and Prevention*, ASM Handbook, Volume 11, 2002, ASM International.
- [7] *Fatigue and Fracture*, ASM Handbook, Volume 19, ASM International.
- [8] *Fatigue and Fracture: Understanding the Basics*, F. C. Campbell, 2012 ASM International.



## MATERIALIZANDO EL FUTURO

Culcasi, J. Daniel<sup>a</sup>; Echarri, Juan Manuel<sup>a</sup>; Palaviccini, Inés<sup>b</sup>.

(a) LIMF: Laboratorio de Investigaciones de Metalurgia Física "Ing. Gregorio Cusminski"

(b) Secretaría de Extensión.

Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata.

Calle 1 y 47. B1900TAG La Plata, Argentina.

e-mail(autor de contacto): [juanmanuel.echarri@ing.unlp.edu.ar](mailto:juanmanuel.echarri@ing.unlp.edu.ar)

**Palabras claves:** Soberanía científico-tecnológica y productiva, desarrollo productivo, indicadores de ingreso, sectores vulnerables de la educación, derecho a la educación universitaria.

### INTRODUCCIÓN

Desde el año 2007, desde la Dirección y Comisión de Carrera de Ingeniería en Materiales se han realizado visitas y charlas en escuelas técnicas y otras escuelas secundarias públicas de la región. Estas charlas tenían como principal objetivo la promoción de la carrera.

Por otra parte, desde el año 2009 la Facultad de Ingeniería ha desarrollado distintas actividades tendientes a fortalecer el ingreso y la permanencia en la facultad, en particular para las carreras de bajo índice de ingreso. Dichas actividades incluyen la realización de videos institucionales y la realización, desde la Secretaría de Extensión, de seminarios en el Colegio Nacional Rafael Hernández, tendientes a dar una visión clara y actual de la práctica de la Ingeniería, acercando al estudiante a las distintas especialidades desde el estímulo a partir de dinámicas pedagógicas recreativas, de su curiosidad e interés y privilegiando el proceso de construcción colectiva.

Tomando en consideración estos antecedentes, teniendo en cuenta que los bajos indicadores de ingreso y permanencia de los sectores populares en carreras tecnológicas muchas veces se encuentran ligadas al desconocimiento de posibilidades académicas, económicas (becas) y de estrategias y lógicas del sector, así como de estrategias pedagógicas que los contengan, se planteó el proyecto de extensión de la Facultad de Ingeniería "Materializando el futuro". Este proyecto tiene por objetivo estimular el pensamiento crítico de los estudiantes secundarios, poniendo en juego los elementos del conocimiento formal en relación a su vida cotidiana, con la intención de dar a conocer las aplicaciones prácticas de la ingeniería y analizarlas desde una perspectiva científica, tecnológica y soberana.

Este proyecto se viene desarrollando en escuelas secundarias públicas de la provincia de Buenos Aires desde mayo de 2015. El desafío del mismo es poner de manifiesto los conocimientos y habilidades propios de los jóvenes estudiantes secundarios que muchas veces resultan ignorados por los adultos. A partir de la implementación, en el año 2006, de la Ley de Educación Nacional la escuela secundaria se vuelve obligatoria, generando el acceso a la educación de jóvenes y adultos de sectores sociales de la población que históricamente estuvieron excluidos. La provincia de Buenos Aires posee una matrícula de más de 1.110.000 alumnos en este nivel educativo, debiendo pensar la perspectiva educativa para todos los sujetos destinatarios (adolescentes, jóvenes y adultos de la sociedad). Se reconocen así, las propias prácticas de los sujetos, sus intereses y particularidades como grupo heterogéneo. En este sentido, pensar una escuela secundaria para todos es reconocer los diversos contextos en los que se encuentran los sujetos: zonas urbanas, pero también rurales; es pensarla para los jóvenes que tienen conflicto con la ley, para aquellos que ayudan en el sostenimiento familiar, para mamás y papás adolescentes, etc. (Gabbai, 2010)<sup>1</sup>. La experiencia escolar de los estudiantes, entonces, es diversa y

adquiere rasgos propios, singulares, según los diferentes grupos de alumnos. El marco general del Diseño Curricular para la Educación Secundaria plantea que la educación en este nivel *“debe centrarse en los sujetos, en primer lugar, en los jóvenes, entendiéndolos como actores sociales con capacidad de acción, como sujetos totales o completos, alejándose así de las miradas estigmatizantes y hegemónicas que leen a las juventudes en clave de incapacidades”*<sup>2</sup>. Es en este sentido que desde el proyecto consideramos a los estudiantes de la educación secundaria como sujetos plenos, con capacidad de decisión, con derechos, responsabilidades y con potencialidad para ejercer y construir ciudadanía. Se piensa una escuela que incluya y reconozca a los jóvenes como portadores de saberes propios, siendo que mucho de lo que ellos saben es ignorado por algunos adultos.

## DESARROLLO

Los integrantes del equipo de trabajo son docentes y estudiantes de la carrera de Ingeniería en Materiales, una coordinadora pedagógica-asistencial (no docente de la Secretaría de Extensión) y una colaboradora externa (bibliotecaria de escuelas co-partícipes del proyecto). Además de los autores, integran el equipo Adriana Kang, Alejandra Slagter, Luciano Borasi, Simón Pasin y Romina Salto, y participaron en algunas de las actividades Tatiana Arturi, Rossana Di Domenicantonio, Lautaro Cervellini y Milagros Dottori.

Inicialmente el proyecto contó con la adhesión de siete escuelas: EEST N° 1 de Brandsen; EES N° 7 de Gómez, Brandsen; EES N° 16 de Los Hornos; EES N° 28 de Villa Elisa; EES N° 3 de Jeppener; EES N° 9 de Brandsen; EEST N° 1 de Bragado y EEST N° 2 de 9 de Julio, posteriormente se sumaron la EEST N° 1 de Saladillo y la EES N° 47 de City Bell, y se realizó una charla y experiencia en el Colegio Santa Margarita de La Plata solicitada por un alumno de dicho colegio (actual alumno de la carrera de Ingeniería en Materiales).

Las actividades consisten en la realización de talleres interactivos en los que se comparten charlas, videos, experiencias y juegos didácticos. Se brinda información acerca de los escenarios en que puede desempeñarse un ingeniero, y se presentan ejemplos de situaciones de la vida cotidiana en que interviene la ingeniería. Los estudiantes analizan los problemas de su comunidad y plantean estrategias de solución. También se ofrece información respecto a formas de ingreso y permanencia en la universidad (becas y otros beneficios).



Fig. 1. Talleres en las EES N° 2 de 9 de Julio y EEST N° 1 de Bragado.

Se inicia el taller explicando qué se estudia en la Facultad de Ingeniería y debatiendo la importancia que tiene la ingeniería en el desarrollo de soberanía tecnológica, productiva y científica del país; se muestran videos de jóvenes ingenieros que hablan de su experiencia laboral y de estudiantes de la carrera de Ingeniería en Materiales que relatan su visión de la carrera; se pide a los destinatarios (estudiantes secundarios) que identifiquen situaciones de la vida cotidiana en las que está involucrada la ingeniería, que señalen problemas y

necesidades prioritarias para su comunidad que podrían abordarse desde la ingeniería y denuncien los obstáculos que encuentran para su solución; se realizan juegos pedagógicos tales como “saltar la pared”, “dar vuelta la bandera”, “caminar la cornisa”, etc., los cuales se definen en función de la cantidad de alumnos participantes y del ámbito en que se desarrolla el taller (estos juegos tienen como objetivo que los estudiantes planteen estrategias para vencer las dificultades que encuentran al acceso a los estudios superiores). Finalizado el desarrollo se hace una síntesis de la actividad realizada con la formulación de expectativas de solución y conclusiones; por último, se brinda información referente a los distintos tipos de becas y ayudas destinadas a los ingresantes a la universidad, particularmente a la Facultad de Ingeniería, y se invita a los participantes a que conozcan la Facultad, organizando para quienes lo deseen visitas guiadas a los laboratorios.



Fig. 2. Actividad “A Saltar la Pared”.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proyecto permitió establecer un vínculo entre la Facultad de Ingeniería y las escuelas co-participes. La mayoría de los estudiantes secundarios que participaron del proyecto desconocían o tenían un conocimiento muy vago de las carreras de ingeniería. Muy pocos aspiraban a acceder a una carrera universitaria y desconocían las condiciones de ingreso así como la existencia de becas.

El principal aporte del proyecto consistió en que estos estudiantes se plantearan la posibilidad de inscribirse en una carrera universitaria. De hecho, ingresaron a Ingeniería en Materiales, y otras carreras de Ingeniería, alumnos de tres de las escuelas participantes de los cuales dos desconocían la existencia de la carrera.

Los directivos y docentes de las escuelas manifestaron su satisfacción por la tarea realizada y con la posibilidad de darle continuidad a la actividad. Como resultado de la vinculación con las escuelas surgió, de parte de directivos de escuelas técnicas, la necesidad de

capacitación de docentes de dichas escuelas responsables de laboratorios. Atendiendo a esta necesidad surgió el proyecto de extensión “Fortalecimiento de la Educación Técnica”, acreditado sin financiamiento por la UNLP para el año 2016.

En la actual convocatoria de proyectos de extensión de la UNLP, se presentarán proyectos que son continuidad de los citados: “Materializando el Futuro” y “Fortalecimiento de la Educación Técnica”. Para esta convocatoria se han sumado nuevas escuelas como co-partícipes de ambos proyectos.

## **CONCLUSIONES**

- La puesta en práctica del presente proyecto permitió establecer vínculos con escuelas secundarias públicas de la Provincia de Buenos Aires.
- Se brindó a los estudiantes de dichas escuelas una aproximación al conocimiento de las herramientas que brinda la ingeniería, despertando en ellos la inquietud por aplicar estos conocimientos en la solución de problemas de su comunidad.
- Se discutió con estos estudiantes la importancia del derecho al acceso a la educación pública gratuita, en un marco de igualdad de oportunidades, y la corresponsabilidad social que ello implica.
- Se discutieron también los conceptos de soberanía científica y tecnológica y la importancia del desarrollo de la industria nacional.
- Estudiantes de las escuelas participantes decidieron estudiar ingeniería a partir de la experiencia de los talleres “Materializando el Futuro”.
- A consecuencia de este proyecto surgió un nuevo proyecto, destinado a la capacitación de docentes de escuelas técnicas.

## **Bibliografía**

- 1.- Gabbai, Inés (2010) “Jóvenes y Escuela secundaria. Relaciones entre trayectorias sociales y trayectorias escolares”, FLACSO, Maestría en Ciencias Sociales.
- 2.- Marco General de los Diseños Curriculares para la Educación Secundaria de la provincia de Buenos Aires



## EFFECTO DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS POST-ALCALINOS SOBRE LAS PROPIEDADES SUPERFICIALES DE TITANIO PARA IMPLANTES DENTALES CON DIFERENTES RECUBRIMIENTOS

Tatiana Ekkert, Adriana Lemos Barboza, Kyung W. Kang, Florencia Gatti  
Carlos Llorente, Pablo Bilmes

Laboratorio de Investigaciones de Metalurgia Física (LIMF), Facultad de Ingeniería,  
Universidad Nacional de La Plata, La Plata CP: 1900, Argentina.  
Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires – CICIPBA  
tatiana.ekkert@ing.unlp.edu.ar

### 1. Introducción

El titanio es ampliamente utilizado en odontología debido a sus excelentes características en cuanto a inercia química, resistencia mecánica con bajo módulo elástico, baja densidad y toxicidad, buena resistencia a la corrosión, fundamentalmente, por ser biocompatible y osteointegrable [1]. A nivel mundial, más de 1000 toneladas de titanio se implantan anualmente en seres humanos en forma de dispositivos biomédicos [2]. El titanio posee una elevada resistencia a la corrosión debido a la presencia de una fina capa de óxido de titanio de 2 a 7 nm de espesor [3,4].

Sin embargo, debido a la incapacidad de este material de inducir el crecimiento de hueso directamente desde su superficie, se llevan a cabo distintos tratamientos superficiales, dependiendo de la aplicación específica. El objetivo es desarrollar un recubrimiento bioactivo que aumente tanto la velocidad inicial de desarrollo óseo como el anclaje biológico de fijación del implante al hueso.

En los últimos tiempos se han desarrollado una gran variedad de tratamientos superficiales que se realizan mediante modificaciones físicas y/o químicas. Uno de los métodos más tradicionales es el blastinizado, donde se utilizan partículas de sílice y alúmina de distintos tamaños y formas [4]. Actualmente se han empezado a utilizar partículas biocompatibles de calcio y fósforo debido a que mejoran la interacción del implante con el tejido.

Dentro de los métodos más modernos, sobresalen aquellos que producen recubrimientos bioactivos como es el caso del anodizado por plasma químico (APQ) y los tratamientos termo químicos. El tratamiento de APQ [5], también conocido como proceso MAO (micro arc oxidation), genera un recubrimiento de tipo cerámico que posee una elevada microdureza, adhesión al metal base y de alta resistencia al desgaste [6]. Este proceso se basa en la ruptura dieléctrica de una capa de óxido aislante en la superficie de un ánodo metálico en contacto con un electrolito adecuado. Durante el proceso aparecen chispas en la superficie del ánodo y desprendimiento de gas en forma de burbujas. El recubrimiento obtenido, que se compone de elementos del ánodo metálico y del electrolito, es una capa de óxido de titanio con P y Ca, bioactiva, porosa, rugosa y firmemente adherida a la superficie. Estas características topográficas y composicionales dependen de los parámetros del tratamiento de APQ, de la composición del electrolito, densidad de corriente o voltaje aplicado y tiempo [7].

Por otro lado, dentro de los tratamientos termo químicos se destaca el tratamiento alcalino, que induce la formación de un hidrogel de titanato de sodio amorfo que favorece el crecimiento de apatita sobre la superficie del implante [8]. Además, cumple la función de transformar las superficies bioinertes a bioactivas logrando mejorar en tiempo y forma el proceso de osteointegración [8,9]. El gel de titanato de sodio que se forma durante el tratamiento alcalino, se puede estabilizar por medio de un tratamiento térmico, como una capa de titanato de sodio denso y parcialmente cristalizado [10,11], cuyo propósito es la mejora de la adhesión y bioactividad del recubrimiento en la superficie del implante. En el presente trabajo se analizaron los efectos que producen diferentes tratamientos térmicos posteriores al alcalino, sobre superficies de titanio cp con tratamiento superficial de



blastinizado y APQ (anodizado por plasma químico). Se evaluaron tres temperaturas de trabajo: 400, 600 y 800°C, con el fin de hallar una temperatura óptima de aplicación. Las superficies se caracterizaron mediante ensayos de ángulo de contacto, difracción de rayos x, SBF (simulated body fluid), adhesión y microscopia electrónica de barrido. Las muestras tratadas a 800°C revelaron una fase completamente cristalina, repercutiendo desfavorablemente en los resultados obtenidos en adhesión y en el crecimiento de la capa de apatita. Sin embargo, las muestras tratadas a 400 y 600°C revelaron una fase parcialmente cristalizada y desarrollaron una superficie bioactiva que indujo el crecimiento de apatita sobre las mismas.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Preparación de muestras

El material de estudio consistió en probetas cilíndricas de Ti c.p ASTM Grado 4, con un diámetro de 9mm y una altura de 4mm. A partir de las mismas se establecieron dos condiciones de análisis: probetas blastinizadas con partículas de calcio y fósforo y, por otro lado, probetas blastinizadas con posterior anodizado por plasma químico (APQ) con un electrolito rico en Ca y P. Ambas condiciones de partida fueron sometidas a un tratamiento termoquímico que consistió en sumergir las muestras en una solución de NaOH 10 M durante 24 hs a una temperatura de 60°C. El objetivo del tratamiento fue formar un gel de titanato de sodio sobre las superficies de las muestras. Posteriormente, se realizó un tratamiento térmico, que consistió en exponer las probetas post tratamiento alcalino a las temperaturas de interés para densificar el gel y mejorar la adhesión al sustrato. Las probetas se colocaron en un crisol y se llevaron durante 1 hora al horno a 400, 600 y 800 °C.

### 2.2 Caracterización de superficies

- **Ensayo de adhesión:** Se realizaron tres indentaciones por muestra con una carga de 150 kg con el fin de evaluar la calidad y la resistencia adhesiva de la capa de titanato formada. Se utilizó un durómetro BSG DL 171 y un penetrador cónico de diamante con una punta de 200 µm de diámetro. A continuación, se observaron en el microscopio electrónico de barrido y la calidad de la adhesión del recubrimiento se comparó con la clasificación especificada por la norma VDI 3198[13].
- **Angulo de contacto:** Se realizó un ensayo de mojabilidad mediante la determinación del ángulo de contacto inicial por goniometría. Se utilizó agua como líquido de prueba, con un goniómetro ramé-hart Model 500 (ramé-hart instrument co.,USA).
- **Difracción de rayos X:** Los estudios de difracción se realizaron con un equipo de rayos x para polvos cristalinos marca Panalytical, modelo Empréan, con detector PixCel 3 de haz rasante con un ángulo de 1 ° en un rango de barrido de 15 a 70 ° con paso de 0,02° y 1 seg/paso. Se analizó el cambio de proporciones de fase amorfa a cristalina del recubrimiento a las distintas temperaturas de trabajo.
- **SBF:** El análisis de la respuesta biológica de las muestras se realizó mediante un ensayo de SBF (Simulated Body Fluid). El mismo consistió en sumergir las muestras en la solución preparada según norma ISO/FDIS 23317-2012 [14] durante 7 días a una temperatura de 37°C.
- **SEM-EDS:** Las superficies luego de la inmersión en SBF fueron observadas mediante microscopia electrónica de barrido FEI QUANTA 200 y analizadas por espectroscopia dispersiva en energías (EDS) para determinar la relación Ca/P. El voltaje utilizado durante el ensayo fue de 20 kV con un aumento de 100x.

En la tabla 1 se presenta la nomenclatura utilizada en este trabajo para los diferentes tratamientos.

Tabla1. Nomenclatura de probetas de estudio.

Nombre completo según tratamiento	Abreviatura
Blastinizado+TratamientoAlcalino+TratamientoTérmico a 400 °C	BNaOH-T400
Blastinizado+TratamientoAlcalino+TratamientoTérmico a 600 °C	BNaOH-T600
Blastinizado+TratamientoAlcalino+TratamientoTermico a 800 °C	BNaOH-T800
Blastinizado+APQ+TratamientoAlcalino+TratamientoTérmico a 400 °C	BAPQNaOH-T400
Blastinizado+APQ+TratamientoAlcalino+TratamientoTérmico a 600 °C	BAPQNaOH-T600
Blastinizado+APQ+TratamientoAlcalino+TratamientoTérmico a 800 °C	BAPQNaOH-T800

### 3. Resultados

Mediante el ensayo de medición de ángulo de contacto se caracterizó la hidrofiliicidad de las superficies de las muestras tratadas termoquímicamente a 400, 600 y 800°C. Se realizaron tres mediciones por muestra. Las mismas presentaron bajos ángulos de contacto, entre 7 y 11°, revelando que todas son muy hidrofílicas.

La calidad y la resistencia adhesiva de la capa de titanato se evaluó mediante el ensayo de adhesión de acuerdo a lo especificado por la norma VDI 3198 [13]. Las indentaciones se observaron mediante microscopía electrónica de barrido y la calidad de adhesión del recubrimiento se comparó con la clasificación especificada por dicha norma.

Las muestras con APQ tratadas térmicamente a 400 y 600 °C desarrollaron una buena adhesión entre el sustrato y el metal, sin desprendimiento de la capa de APQ ni formación de fisuras sobre la superficie como se observa en la Figura 1 a-b.

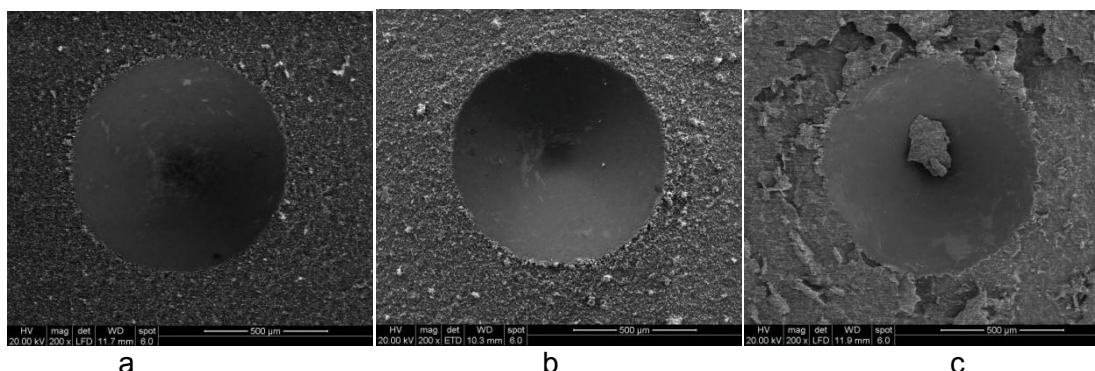


Figura 1. Imagen SEM del ensayo de adhesión de las muestras Blastinizado+APQ con tratamiento alcalino y térmico: a) 400°C, b) 600 °C y c) 800 °C.

Por otro lado, las muestras con APQ tratadas térmicamente a 800 °C presentaron una mala adhesión, en la figura 1c se puede observar un desprendimiento del recubrimiento del sustrato. Este resultado se sustenta con los datos obtenidos en los ensayos de difracción de rayos x realizados a las muestras tratadas a 800°C donde se observó una fase totalmente cristalina.

El ensayo de difracción de rayos x permitió identificar la evolución de la fase amorfa a cristalina de la capa de titanato de sodio luego del tratamiento térmico a distintas temperaturas. Los tratamientos térmicos entre 400 y 800°C aumentan la cristalinidad del recubrimiento. En la Figura 2 se pueden observar los difractogramas de muestras tratadas a 400, 600 y 800 °C respectivamente.

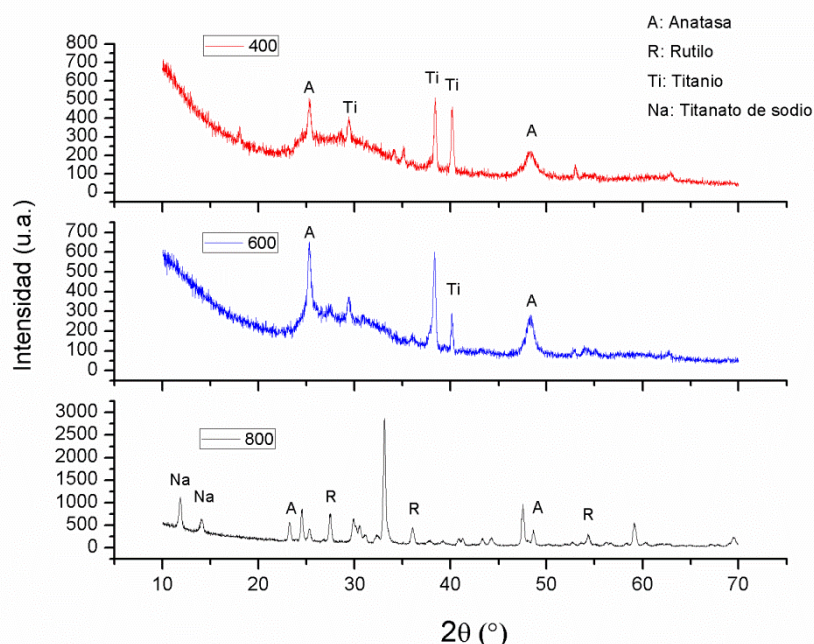


Figura 2. Difractogramas de las muestras con tratamiento térmico. Curva roja: 400°C, azul: 600°C, negra: 800°C.

El difractograma correspondiente a la muestra tratada térmicamente a 400°C, presenta una zona de curvatura amorfa con picos anchos y de baja intensidad. En la misma se identificaron picos compatibles con la presencia de fases cristalinas de titanio metálico como también de óxido de titanio correspondiente a la anatasa. La muestra tratada térmicamente a 600°C, también continúa revelando una fase amorfa de titanato de sodio. Se identificaron picos compatibles con la presencia de fases cristalinas de titanio metálico, al igual que de óxido de titanio correspondiente a la anatasa. Sin embargo, hay algunas diferencias entre los difractogramas de las muestras tratadas a 400°C Y 600°C. Se observa un aumento en la intensidad de los picos de óxido de titanio (anatasa) en la muestra tratada a 600°C y, a su vez, una disminución de los picos del titanio metálico. Además los picos son más angostos y de mayor intensidad, manifestando de esta manera una mayor cristalización, en cambio los picos de la curva roja (400°C) son más bien anchos.

Por último, el difractograma de la muestra tratada térmicamente a 800°C no presenta fase amorfa. Se identificaron picos compatibles con la presencia de fases cristalinas de anatasa y de rutilo. En este último difractograma aparecen los picos característicos del titanato de sodio ( $\text{Na}_2\text{Ti}_6\text{O}_{13}$ ) que cristalizó completamente.

Con el ensayo de inmersión en la solución de simulación de fluido humano (SBF) se evaluó la capacidad bioactiva de las muestras de formar capas cerámicas de fosfato de calcio sobre sus superficies. Estas fueron sumergidas durante 7 días a 37°C. Las probetas BNaOH-T400, BAPQNaOH-T400 como las de BNaOH-T600 y BAPQNaOH-T600 desarrollaron en sus superficies una capa cerámica de fosfato de calcio (figura 3). Dicho recubrimiento se caracterizó cualitativamente mediante espectrómetro dispersivo de energías (EDS) y se obtuvieron relaciones de Ca/P de 1,5 propios de una apatita ósea [12].

Por otro lado, las muestras BNaOH-T800 y BAPQNaOH-T800, luego del ensayo de inmersión en SBF, no presentaron ningún crecimiento de apatita sobre sus superficies. Este comportamiento de inhibir la capacidad de formación de apatita sobre la superficie de las muestras, podría estar asociado con el alto porcentaje de cristalización que presentan las mismas luego del tratamiento térmico a 800°C.

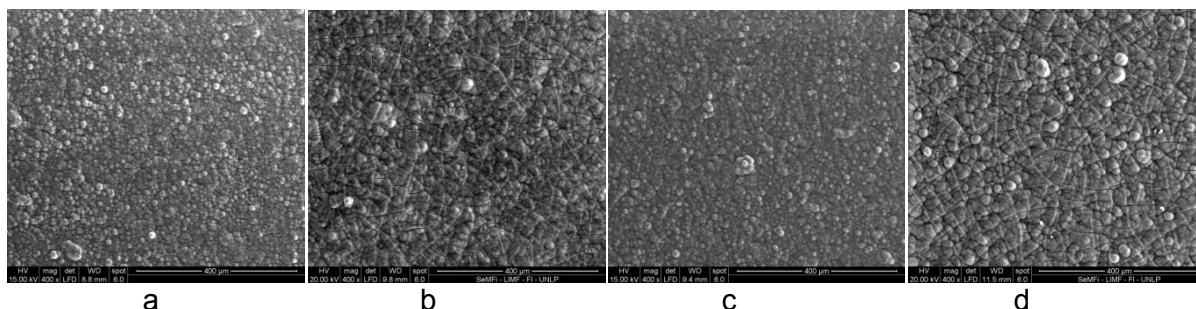


Figura 3. Imagen SEM de las muestras ensayadas en SBF: a) BAPQNaOH-T400, b) BNaOH-T400, c) BNaOH-T600 y d) BAPQNaOH-T600.

#### 4. Discusión

El tratamiento térmico realizado a las temperaturas de 400, 600 y 800°C desarrolló, en todas las muestras, superficies muy hidrofílicas con valores de ángulo de contacto muy bajos, comprendidos entre los 7 y 11°. Las muestras tratadas térmicamente a 800°C revelaron mediante difracción de rayos x, una fase completamente cristalina. Este resultado repercutió en los ensayos de adhesión, donde se observó desprendimiento de la capa de titanato y formación de fisuras, representando una adherencia inaceptable entre el recubrimiento y sustrato. Por otro lado, a pesar de desarrollar una superficie muy hidrofílica, en el ensayo de SBF también se obtuvieron resultados negativos, ya que no se logró inducir el crecimiento de apatita sobre las superficies de las muestras tratadas. Las muestras tratadas a 400 y 600°C manifestaron características muy similares entre sí. El difractograma de la muestra tratada a 400°C reveló menor presencia de fase cristalina en comparación a la muestra tratada a 600°C. Estas diferencias se observaron en las dimensiones y la intensidad de los picos obtenidos en los difractogramas. Con respecto al ensayo de adhesión, ambas condiciones de temperatura respondieron favorablemente, representando una adherencia aceptable, sin desprendimientos del recubrimiento ni presencia de fisuras. Tras la inmersión de 7 días en SBF, las muestras desarrollaron superficies bioactivas que indujeron el crecimiento de apatita de un considerable espesor, ya que en los espectros realizados a altos voltajes de EDS (25kV) el porcentaje de titanio detectado es muy pequeño.

#### 5. Conclusiones

Tras analizar los resultados se concluye que la temperatura de 800°C queda descartada como posible temperatura óptima de trabajo ya que al cristalizar completamente no desarrolló una superficie bioactiva y representó una adherencia inaceptable entre el recubrimiento y el sustrato.

Las temperaturas de trabajo de 400 y 600°C manifestaron características muy similares entre sí. Ambas desarrollaron superficies bioactivas que lograron nuclear la capa de fosfato de calcio y obtuvieron buena respuesta en cuanto a la adhesión del recubrimiento al sustrato. Para poder establecer una óptima condición de trabajo y seleccionar una sola temperatura, se deberá realizar un análisis cuantitativo, que consiste en medir el espesor de la capa cerámica de fosfato de calcio que se forma sobre una superficie y otra. Como también analizar la velocidad de nucleación de la capa de apatita en ambas condiciones. Del presente trabajo se concluye que las temperaturas de 400 y 600°C son temperaturas que desarrollaron superficies hidrofílicas, bioactivas y con buena adhesión.

#### 6. Bibliografía

- [1] ADYA, N., ALAM, M., RAVINDRANHAT, T., MUBEEN, A., SALUJA, B., "Corrosion in titanium dental implants: literature review", The journal of Indian Prosthodontic Society, v. 5, pp. 126-131, Jul.2015.
- [2] ADDISON, O., DAVENPORT, A.J., NEWPORT, R.J., KALRA, S., MONIR, M., MOSSELMANS, J.F.W., PROOPS, D., MARTIN, R.A., "Do 'passive' medical titanium surfaces



- deteriorate in service in the absence of wear?”, *Journal of the Royal Society Interface*, v. 9, n. 76, pp. 3161-3164, Jul. 2012.
- [3] CARNEIRO-CAMPOS, L.E., FERNANDES, C.P., BALDUIÑO, A., LEITE, M.E., LEITAO, M., “The effect of titanium topography features on mesenchymal human stromal cells’ adhesion”, *Clinical Oral Implants Research*, v. 21, n. 2, pp. 250-254, Feb. 2010.
- [4] YAN GUO, C., MATINLINNA, J.P., TANG, A.T., “Effects of Surface Charges on Dental Implants: Past, Present, and Future”, *International Journal of Biomaterials*, v. 2012, pp. 1-5, Sep. 2012.
- [5] BRUSCHI, M., STEINMULLER-NETHL, D., GORIWODA, W., RASSE, M., “Composition and modifications of dental implant surfaces”, *Journal of oral implants*, v. 2015, pp.1-14, Dec.2014.
- [6] AGARWAL, A., TYAGI, A., AHUJA, A., KUMAR, N., DE, N., BHUTANI, H., “Corrosion aspect of dental implants-An overview and literature review”, *Open Journal of Stomatology*, v. 4, n. 2, pp. 56-60, Feb. 2014.
- [7] KRZAŁA, A., KAZEK-KEŚIK, A., SIMKA, W., “Application of plasma electrolytic oxidation to bioactive surface formation on titanium and its alloys”, *RSC Advances*, v. 3, pp. 19725-19743, Aug. 2013.
- [8] LEMOS, A., CERLIANI, A., KANG, K., ECHARRI, J., LLORENTE, C., BILMES, P., SCARANO, N., BORASI, L., “Caracterización superficial y transversal de implantes dentales de titanio blastinizados y anodizados por plasma químico”. In: *Actas del XI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica CIBIM 2013*, pp. 1108-1117, La Plata, Nov. 2013
- [9] KIM, H.M., MIYAJI, F., KOKUBO, T., NAKAMURA, T., “Effect of heat treatment on apatite-forming ability of Ti metal induced by alkali treatment”, *Journal of Materials Science Materials in Medicine*, v. 8, n. 6, pp. 341-347, Jun. 1997.
- [10] CUESTA, J., ESTUPIÑAN, H.A., PEÑA B., D.Y., VÁSQUEZ Q., C., “Comportamiento electroquímico de recubrimientos Ca - P obtenidos mediante anodizado por plasma químico (APQ) tratados térmicamente”, *Scientia et Technica*, v. 1, n. 36, pp. 233-238, Sep. 2007.
- [11] APARICIO, C., PADRÓS, A., PLANELL, J.A., GIL, F.J., “Superficies de titanio en implantes dentales de carga inmediata”, *Biomecánica*, v. 14, n. 1, pp. 8-15, 2006.
- [12] ZHAO, G., XIA, L., ZHONG, B., WU, S., SONG, L., WEN, G., “Effect of alkali treatments on apatite formation of microarc-oxidized coating on titanium alloy surface”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, v. 25, n. 4, pp. 1151-1157, Abr. 2015.
- [13] Verein Deutscher Ingenieure Normen, VDI 3198, VDI-Verlag, Dusseldorf, 1991.
- [14] Implantsforsurgery - In vitro evaluation for apatite-forming ability of implant materials, ISO 23317:2012.



## ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE PROCESO DEL ANODIZADO POR PLASMA QUÍMICO EN Ti-6Al-4V ELI PARA IMPLANTES DENTALES

Azpeitia, Anahí <sup>(1)</sup>; Kang, Kyung Won <sup>(1)</sup>; Lemos, Adriana <sup>(1)</sup>;  
Llorente, Carlos <sup>(1,2)</sup> y Bilmes, Pablo <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Laboratorio de Investigaciones de Metalurgia Física “Ing. Gregorio Cusminsky” (LIMF), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 1 y 47, La Plata (1900).

<sup>(2)</sup> Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires – CICPBA.  
[azpeitiaanahi@gmail.com](mailto:azpeitiaanahi@gmail.com)

**Palabras claves:** *Ti-6Al-4V, anodizado por plasma químico, implantes.*

### INTRODUCCIÓN

Los sistemas biológicos tienen la capacidad de reconocer cualquier detalle a nivel molecular y debido a que las células no responden en forma directa a las condiciones superficiales sino que lo hacen a través de las moléculas adsorbidas en la superficie del implante, es importante conocer la influencia de la composición química, topografía y rugosidad superficial, energía superficial y propiedades fisicoquímicas superficiales de los implantes [1,2]. La energía superficial, mojabilidad (hidrofobicidad o hidrofiliidad), composición química, carga superficial y topografía, entre otros factores, tienen una fuerte influencia en la estabilidad a largo plazo del implante. Por otro lado, si bien la energía superficial de los biomateriales tiene una influencia en la adhesión y proliferación celular, en términos de orientación celular juegan un papel más relevante la textura, morfología y rugosidad de la superficie [3,4].

El titanio es el biomaterial de mayor uso como implante en odontología y traumatología. La extensa aplicación de este biomaterial se debe a que es uno de los metales más biocompatibles, con una excelente combinación de resistencia a la corrosión y alto rendimiento mecánico. La resistencia a la corrosión del titanio se debe a su capacidad para formar una capa de óxido protectora, bioinerte, químicamente estable, continua y altamente adherente sobre su superficie [1]. No obstante, si bien el titanio es un material osteoconductor, su capacidad de inducir formación de hueso es bastante pobre o nula, a diferencia de los materiales bioactivos, como las apatitas, que en determinadas condiciones presentan características osteoinductoras, es decir, inducen o estimulan una diferenciación de células madre a células osteogénicas [5]. Es evidente que la respuesta de un biomaterial depende de sus propiedades superficiales y con el fin de mejorar su rendimiento en los sistemas biológicos, existe una urgente necesidad de desarrollar tratamientos y/o recubrimientos superficiales que incrementen la bioactividad de los implantes y, con ello, su rendimiento clínico.

Dentro de los numerosos tratamientos superficiales desarrollados, se encuentra el anodizado por plasma químico (APQ). Este tratamiento superficial permite generar recubrimientos de tipo cerámico en la superficie de diversos metales entre los cuales se encuentra el titanio. En el proceso de APQ, el ánodo, de material metálico, es inmerso en una solución acuosa, y se aplica una diferencia de potencial o corriente constante, permitiendo la ruptura dieléctrica. Utilizando la técnica de APQ, se obtienen recubrimientos con alta dureza, adhesión y resistencia al desgaste. Las propiedades físicas, químicas y mecánicas del recubrimiento están determinadas por los parámetros de proceso, como la composición y temperatura del electrolito, composición del metal, el voltaje, la densidad de corriente, el tiempo, etc [6]. De la misma manera, el tratamiento alcalino [1] ha despertado un interés creciente debido a su simplicidad y eficacia. La formación de un hidrogel de titanato de sodio amorfo sobre las superficies de titanio luego de los tratamientos alcalinos, puede inducir la formación de apatita después de la inmersión durante un cierto tiempo en

un fluido corporal simulado (SBF). En consecuencia, la combinación del proceso de APQ con el tratamiento alcalino produce superficies bioactivas, con una prometedora perspectiva en la producción industrial debido a la simplicidad y bajo costo.

En este trabajo se llevaron a cabo distintos tratamientos de APQ bajo diferentes condiciones de densidad de corriente, tiempo de exposición y composición química del electrolito; que produjeron recubrimientos superficiales de óxido de titanio enriquecido en calcio y fósforo. Luego de cada tratamiento de APQ, se efectuó un tratamiento alcalino para evaluar su influencia sobre la bioactividad del recubrimiento obtenido. Para caracterizar las superficies se efectuaron observaciones topográficas mediante microscopía electrónica de barrido, ensayos de adhesión a partir del test estándar Rockwell-C [7] y evaluación de la bioactividad mediante ensayo de simulación en fluidos corporales (SBF) [8].

## PARTE EXPERIMENTAL

### Material

Se utilizó como material de estudio la aleación Ti-6Al-4V ELI (*Extra Low Interstitial*) para aplicación quirúrgica (UNSR56401) ASTM F 136-02a. Se emplearon muestras cilíndricas de 8mm de diámetro y 3mm de espesor. Las condiciones superficiales de partida fueron: mecanizado (M) y blastinado (B). Este último tratamiento se realizó con partículas de fosfato de calcio con un tamaño promedio de 300µm, durante dos minutos a 6 bar de presión.

### Procedimiento experimental

Todas las muestras fueron previamente decapadas empleando una solución de ácido nítrico 0,2 M y ácido fluorhídrico 0,1 M durante 1 minuto. Posteriormente, se les aplicó el tratamiento de APQ en forma galvanostática, utilizando como referencia los parámetros de proceso (composición química del electrolito y densidad de corriente) estudiados por Wanxia et al., Quintero et al. y Galvis et al. [9-11]. Por último, se realizaron dos enjuagues con agua bidestilada, secado al aire y envasado individual en films de polietileno. A continuación, se especifican los electrolitos utilizados y las condiciones en que se realizaron los tratamientos de APQ:

**A-** Fosfato de Calcio Anhidro ( $\text{CaHPO}_4$ ) / Acetato de Calcio ( $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ )

**B-** Ácido Fosfórico/Ácido Sulfúrico: 0,25M de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y 0,25M de  $\text{H}_3\text{PO}_4$

**C-** Fosfato Biácido de Potasio: 0,15M Acetato de Calcio ( $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ), 0,15M de EDTA y 0,05M de Fosfato dihidrógeno de Potasio ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ).

En particular, la selección de los electrolitos "A" y "B" se debió a que son los electrolitos utilizados para el APQ de Ti ASTM Grado 4, siendo importante analizar su aplicabilidad en la aleación Ti-6Al-4V.

En una primera instancia, se trabajó con el electrolito "C" bajo las siguientes condiciones: densidades de corriente de 25, 50 y 75  $\text{mA}/\text{cm}^2$  y tiempos de 3 y 6 minutos. Bajo algunas de estas condiciones planteadas, se produjo un aumento localizado de la temperatura en la interfaz electrolito/aire, provocando la interrupción del proceso, lo cual obligo a redefinir las condiciones experimentales: 25  $\text{mA}/\text{cm}^2$  a 3 y 6 minutos; 40  $\text{mA}/\text{cm}^2$  a 3 minutos; 50  $\text{mA}/\text{cm}^2$  a 2,45 minutos y 75  $\text{mA}/\text{cm}^2$  a 2,5 minutos.

A la luz de los resultados preliminares obtenidos en la primera etapa, se fijó la densidad de corriente en 25  $\text{mA}/\text{cm}^2$  y el tiempo de proceso en: 1; 2; 2,5, 3 y 4 minutos, para los tres electrolitos en estudio (Tabla 1).

**Tabla 1:** Parámetros de proceso de APQ utilizados en la segunda etapa.

Electrolito	Superficie de partida	Tiempo (Minutos)	Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )
“A” Fosfato/acetato	M	1; 2 y 2,5	25
“A” Fosfato/acetato	M y B	3 y 4	25
“B” Fosfórico/sulfúrico	M	1; 2 y 2,5	25
“B” Fosfórico/sulfúrico	M y B	3 y 4	25
“C” Fosfato biácido de potasio	M	1; 2 y 2,5	25
“C” Fosfato biácido de potasio	M y B	3 y 4	25

### 2.3 Técnicas de caracterización

Para la caracterización topográfica de las muestras se utilizó un microscopio electrónico de barrido ambiental FEI Quanta 200 (ESEM) y los microanálisis químicos se realizaron con un espectrómetro dispersivo en energías EDAX Apollo 40 (EDS) adosado al ESEM. La calidad y la resistencia adhesiva de los recubrimientos, obtenidos mediante APQ, se evaluaron a partir del ensayo de indentación Rockwell C, según la norma VDI 3198 [7]. Se realizaron dos indentaciones en cada muestra bajo estudio aplicando una carga de 150 Kg. Posteriormente, se realizaron las observaciones de las superficies mediante ESEM.

Por otro lado, a un grupo de las muestras con APQ se les realizó un tratamiento alcalino en una solución 10M de Na(OH) durante 24hs a 60°C. Terminado el tratamiento alcalino, las muestras se enjuagaron con agua bidestilada y se secaron al aire. Por último, se evaluó la bioactividad mediante ensayo de simulación en fluidos corporales (SBF) durante 7 días de las muestras con APQ, con y sin tratamiento alcalino, que presentaron mejor comportamiento a la adhesión y homogeneidad superficial. El ensayo en SBF se llevó a cabo según la norma ISO 23317:2012 (E) [8]. Luego de los ensayos en SBF, se realizó la observación y análisis químico de las superficies resultantes mediante ESEM-EDS.

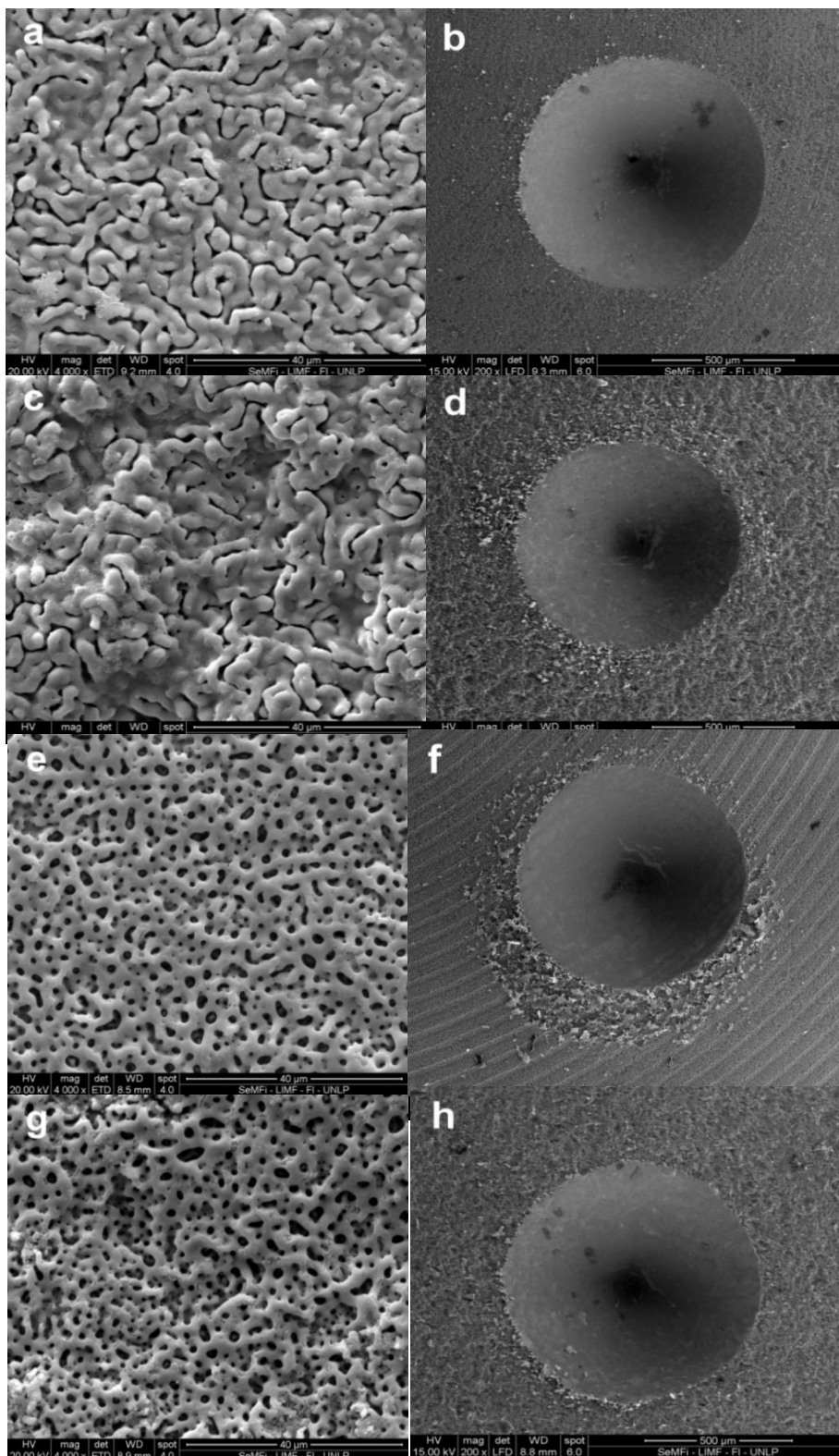
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Anodizado por plasma químico (APQ)

Los recubrimientos generados en la primera etapa con el electrolito “C”, con densidades de corriente mayores a 40 mA/cm<sup>2</sup> y tiempo de ensayo de 3 minutos, como así también los recubrimientos generados con densidades de corriente de 25 mA/cm<sup>2</sup> y 6 minutos de ensayo, no presentaron buena adherencia. De esta etapa, la única condición que cumplió con los parámetros establecidos por la norma VDI 3198, fue la muestra tratada con densidad de corriente de 25 mA/cm<sup>2</sup> y un tiempo de 3 minutos.

Respecto a los resultados obtenidos en la segunda etapa, los tratamientos de APQ realizados con los tres electrolitos en las muestras con superficies mecanizadas, indican que el recubrimiento cerámico no es homogéneo con tiempos de ensayo inferior a 3 minutos (Tabla 1). No obstante, con densidad de corriente de 25 mA/cm<sup>2</sup> a 3 y 4 minutos de tratamiento se lograron resultados satisfactorios. De estas últimas condiciones, las muestras que presentaron menor adhesión y homogeneidad de recubrimiento fueron las obtenidas con el electrolito “A”, tanto para la superficie de partida mecanizada (sin blastinizado) como para la blastinizada. Por otro lado, se pudo establecer que las muestras anodizadas en los electrolitos “B” y “C” a 4 minutos, en ambas condiciones superficiales de partida, presentaron un recubrimiento cerámico homogéneo y con un mejor comportamiento en adhesión que a 3 minutos de proceso. Sin embargo, en los tres electrolitos, las muestras cuyas superficies de partida fueron blastinizadas previo al tratamiento de APQ, presentaron una mejor adherencia sustrato-recubrimiento que las muestras sin blastinizado (mecanizadas). En la Figura 1, se pueden observar las topografías y las indentaciones obtenidas en el ensayo de adhesión de las muestras con los tratamientos en los electrolitos “B” y “C” a 4 minutos, con y sin blastinizado. Estos presentaron una topografía similar a las

obtenidas por otros autores [9-13]. Es importante señalar que, si bien los recubrimientos obtenidos con el electrolito "A" fueron los que presentaron resultados poco satisfactorios en cuanto a adhesión, dicho electrolito no debe ser descartado siendo necesario realizar un trabajo experimental más amplio para establecer mejores condiciones operativas de densidad de corriente y tiempo para obtener un recubrimiento que cumpla con la adherencia y homogeneidad superficial.





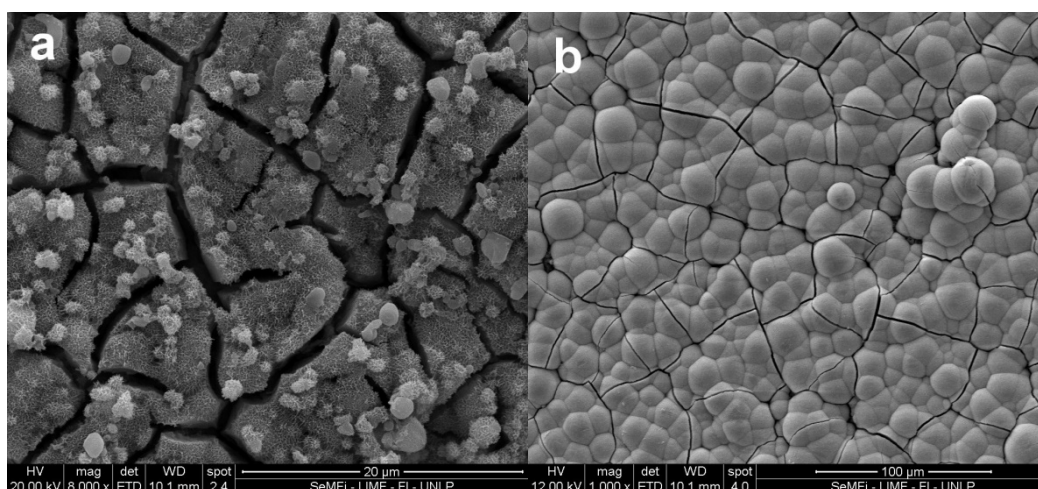
**Figura 1:** Imágenes ESEM de la topografía e indentación del ensayo de adhesión de muestras con tratamiento APQ a  $25\text{mA}/\text{cm}^2$  y 4 minutos. Muestras anodizadas con el electrolito "B": (a-b) sin blastinizado, (c-d) con blastinizado

Muestras anodizadas con el electrolito "C": (e-f) sin blastinizado, (g-h) con blastinizado.

### Tratamiento alcalino y SBF

La simulación en fluidos corporales (SBF), según la norma ISO 23317:2012 (E), permite estudiar in vitro la formación de apatita en la superficie de las muestras y predecir la bioactividad de las mismas. Se evaluó la bioactividad en SBF de las muestras obtenidas con los electrolitos "B" y "C", con y sin blastinizado, a 4 minutos. A un grupo de dichas muestras se les realizó un tratamiento alcalino previo al ensayo en SBF. Algunos autores [13-15] demuestran que funcionalizar las superficies con un tratamiento alcalino antes del ensayo en SBF ayuda a la precipitación de apatita en menores tiempos de exposición. La respuesta bioactiva del recubrimiento, observada a través del ensayo de SBF, está asociada a la funcionalización de la superficie con los grupos Ti-OH, que se producen como consecuencia del tratamiento alcalino en Na(OH) [15].

En la Figura 2a se puede apreciar la superficie resultante luego de llevar a cabo el tratamiento alcalino en Na(OH) (en todas las muestras la topografía de la superficie, luego del tratamiento alcalino, es similar). Dicha superficie tiene una topografía similar a la obtenida por Zhao et al. [13] y la formación de grietas se debe a la deshidratación del hidrogel formado. En la Figura 2b se puede observar, en una muestra con tratamiento alcalino, un precipitado bioactivo homogéneo en toda la superficie después de 7 días de inmersión en SBF. En las muestras sólo con anodizado por plasma químico (APQ) no se observó este precipitado bioactivo.



**Figura 2:** (a) Imagen de ESEM de una muestra con tratamiento APQ a  $25\text{mA}/\text{cm}^2$  y 4 minutos y posterior tratamiento alcalino en Na(OH) (b) Imagen de ESEM del precipitado bioactivo obtenido luego del ensayo de SBF de las muestras con tratamiento APQ a  $25\text{mA}/\text{cm}^2$  y 4 minutos y posterior tratamiento alcalino en Na(OH).

En la tabla 2 se presentan los resultados del análisis realizado con EDS de los precipitados bioactivos obtenidos en el ensayo de SBF. Si bien las relaciones atómicas de Ca/P de las capas de apatita depositadas son menores que las de la apatita estequiométrica (1,67), este valor se encuentra dentro del error de la técnica EDS.



**Tabla 2:** Análisis EDS de la capa de hidroxiapatita formada luego del ensayo de SBF a 7 días de las muestras con tratamiento APQ a 25mA/cm<sup>2</sup>, 4 minutos y tratamiento alcalino.

Tratamiento	Elementos At%		Relación Ca/P
	Ca	P	
Fosfórico/sulfúrico, (B)	24,81	16,03	1,6
Fosfórico/sulfúrico, (M)	21,90	14,59	1,5
Fosfato biácido de potasio, (B)	24,40	16,44	1.5
Fosfato biácido de potasio, (M)	23,95	16,01	1.5

## CONCLUSIONES

A partir de los análisis realizados mediante ESEM de todas las muestras, en sus diferentes condiciones, se evidencia que las superficies que presentan un recubrimiento cerámico uniforme corresponden a las muestras tratadas con los electrolitos de fosfórico/sulfúrico y fosfato biácido de potasio, mientras que el electrolito de fosfato/acetato da como resultado un recubrimiento heterogéneo.

Según lo dispuesto en la norma VDI 3198, los parámetros de APQ dados por densidad de corriente de 25mA/cm<sup>2</sup> y 4 minutos de tratamiento, determinan un comportamiento favorable del recubrimiento obtenido, frente al ensayo de adhesión con el metal base. Por otro lado, la incorporación de un tratamiento de blastinizado previo mejora la respuesta en adhesión.

Por último, el ensayo en SBF a 7 días demostró que el tratamiento alcalino en Na(OH) posterior al APQ, mejora la bioactividad formando una capa de apatita homogénea en la superficie.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Kulkarni, M., Mazare, A., Schmuki, P., Iglíč, A. "Biomaterial surface modification of titanium and titanium alloys for medical applications", In: Seifalian, A., de Mel, A., Kalaskar, D.M. (eds), Nanomedicine, 1ed., Chapter 5, Manchester, United Kingdom, One Central Press, 2014.
- [2] Goriainov, V., Cook, R., Latham, J.M., Dunlop, D.G., Oreffo, R.O.C., Acta Biomaterialia, v. 10, n. 10, pp. 4043-4057, 2014.
- [3] Albrektsson, T., Wennerberg, A., The International Journal of Prosthodontics, v. 17, n. 5, pp. 536-543, 2004.
- [4] Albrektsson, T., Wennerberg, A., The International Journal of Prosthodontics, v. 17, n. 5, pp. 544-564, 2004.
- [5] Vallet Regi, M., Munuera, L., Biomateriales aquí y ahora, 1 ed., Madrid, Dykinson, 2000.
- [6] Wang, Y., Yu, H., Chen, C., Zhao, Z., Materials and design, v. 85, pp. 640-652, 2015.
- [7] Verein Deutscher Ingenieure Normen, VDI 3198, VDI-Verlag, Dusseldorf, 1991.
- [8] Implants for surgery-In vitro evaluation for apatite-forming ability of implant materials, ISO 23317:2012.
- [9] Wanxia, T., Jikang, Y., Gang, Y., Guoyou, G., Rare Metal Materials and Engineering, v. 43, n. 12, pp. 2883-2888, 2014.
- [10] Quintero, D., Galvis, O., Calderón, J.A., Castaño, J.G., Echeverría, F., Surface & Coatings Technology, v. 258, pp. 1223-1231, 2014.
- [11] Galvis, O.A., Quintero, D., Castaño, J.G., Liu, H., Thompson, G.E., Skeldon, P., Echeverría, F., Surface & Coatings Technology, v. 269, pp. 238-249, 2015.

- [12] Shi, X., Wang, Q., Wang, F., Ge, S., Mining Science and Technology, v. 19, n. 2, pp. 220-224, 2009.
- [13] Zhao, G., Xia, L., Zhong, B., Wu, S., Song, L., Wen, G., Transactions of Nonferrous Metals Society of China, v. 25, n. 4, pp. 1151-1157, 2015.
- [14] Li, N., Xiao, G., Liu, B., Wang, Z., Zhu, R., Lu, Y., Surface & Coatings Technology, v. 301, pp. 121-125, 2016.
- [15] Li, J., Liu, X. "Chemical surface modification of metallic biomaterials", In: Wen, C. (ed), Surface Coating and Modification of Metallic Biomaterials, 1 ed., chapter 5, Amsterdam, Netherlands, Elsevier, 2015.

## ESTUDIO DE LA BIOACTIVIDAD DE IMPLANTES DENTALES DE TITANIO C.P. G4 TRATADOS SUPERFICIALMENTE

Lemos, Adriana <sup>(1)</sup>, Gatti, María Florencia <sup>(1)</sup>, Ekkert, Tatiana <sup>(1)</sup>  
Kang, Kyung Won <sup>(1)</sup>, Llorente, Carlos <sup>(1,2)</sup> y Bilmes, Pablo <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Laboratorio de Investigaciones de Metalurgia Física “Ing. Gregorio Cusminsky” (LIMF), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Calle 1 y 47, La Plata (1900).

<sup>(2)</sup> Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires – CICPBA.

[adriana.barboza@ing.unlp.edu.ar](mailto:adriana.barboza@ing.unlp.edu.ar)

**Palabras claves:** Blastinizado, APQ, Tratamiento alcalino, SBF.

### 1. INTRODUCCIÓN

Hoy día está bien reconocido que la superficie del biomaterial implantable juega un papel determinante en la interacción con el medio biológico. Así, en gran medida la eficacia de los implantes artificiales se establece principalmente por sus características superficiales, tales como morfología de la superficie y estructura, composición química, rugosidad, hidrofiliidad, etc.; dado que estas propiedades influyen en la adsorción de las biomoléculas que intervienen en la adhesión de las células deseables para el proceso de osteointegración [1]. Por todo lo anterior, los nuevos diseños de implantes dentales de titanio se están direccionando a aplicar tratamientos y/o recubrimientos para transformar sus superficies bioinertes en bioactivas e hidrofílicas, lo cual permite acelerar y mejorar sustancialmente en los inmediatos estadíos post implantación y la secuencia de eventos biológicos que aseguran una rápida y duradera osteointegración. Entre los clásicos tratamientos superficiales del titanio que promueven la osteointegración se destacan el blastinizado, el anodizado por plasma químico y el tratamiento alcalino en NaOH.

En el tratamiento de blastinizado se utilizan pequeñas partículas abrasivas propulsadas por una corriente de gas que impactan sobre la superficie de la muestra. La magnitud de la modificación superficial depende de los parámetros de proceso: tamaño, composición y forma de la partícula, presión y tiempo de blastinizado [2]. En general, en el blastinizado de los implantes de titanio, se utilizan partículas de óxido de titanio (TiO<sub>2</sub>), sílice (SiO<sub>2</sub>) y alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) de distintos tamaños y formas [3-5]. El mayor inconveniente que genera el blastinizado con este tipo de partículas es que una gran cantidad de las mismas permanecen adheridas a la superficie luego del tratamiento y limpieza del implante. Algunos estudios han demostrado que la liberación de estas partículas no biocompatibles provocan una reacción adversa en el huésped [6-7]. Por esta razón, se han empezado a utilizar partículas biocompatibles, que contienen calcio y fósforo, que no comprometen la interacción del implante con el tejido [7]

Por otro lado, el tratamiento de anodizado por plasma químico (APQ), también conocido como proceso MAO (*micro-arc oxidation*), genera un recubrimiento biocerámico. Este proceso se basa en la ruptura dieléctrica de una capa de óxido aislante en la superficie de un ánodo metálico en contacto con un baño electrolítico acuoso que contiene elementos modificadores como por ejemplo calcio y fósforo. Estudios previos muestran que el Ca y P presente en el baño electrolítico, puede cristalizar en fosfato de calcio o incluso formar directamente una apatita superficial (bioactiva) [8-9]. Otra ventaja que presenta este proceso es que los revestimientos producidos por APQ tienen naturaleza porosa que puede mejorar el anclaje de los implantes al hueso [10]. Algunos autores mencionan que es difícil que las superficies tratadas solamente con APQ puedan proporcionar la suficiente bioactividad dentro de las primeras etapas de implantación [11-12]. El tratamiento alcalino sobre titanio y sus aleaciones induce la formación de un hidrogel de titanato de sodio amorfo, con una

morfología de nanoesponja en la superficie del titanio, que favorece notablemente la bioactividad del implante [13-15].

El presente trabajo se centró en el estudio del comportamiento bioactivo de muestras de titanio cp blastinado con partículas de fosfato de calcio, anodizado por plasma químico (APQ) con previo blastinado con partículas de fosfato de calcio, y ambas condiciones sometidas a un posterior tratamiento alcalino de NaOH.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

Se utilizó como material de estudio Ti c.p. ASTM Grado 4 (0.0039% N, 0.0112% C, 0.11% Fe, 0.24% O, 0.00% H, Ti bal.). Las muestras, se sometieron a un tratamiento de blastinado durante 2 minutos con partículas angulares de fosfato de calcio a 6 Bar de presión. A continuación, dichas muestras fueron anodizadas por medio de un plasma químico en una solución electrolítica a base de fosfato de calcio anhidro ( $\text{CaHPO}_4$ ) y acetato de calcio ( $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ ). El tratamiento alcalino se realizó en una solución acuosa 10 M de hidróxido de sodio durante un tiempo de 24 hs a una temperatura de 60 °C.

La respuesta biológica se evaluó a partir de la norma ISO-FIS 23317:2012 (E) [16]. Las muestras fueron sumergidas en SBF a 37 °C con un pH 7,4 durante 7 días. La morfología y composición superficial de las muestras, se evaluó con microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectrometría dispersiva en energías (EDS). Esto fue realizado en un microscopio electrónico ambiental FEI Quanta 200 y un espectrómetro dispersivo en energías EDAX Apollo 40 (EDS) adosado al SEM. Se realizaron medidas de ángulo de contacto a temperatura ambiente empleando agua como líquido de prueba. Se utilizó un goniómetro ramé-hart Model 500 (rame-hart instrument co., USA). El enlace químico y composición se evaluó a partir de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (ATR-FTIR). La caracterización de las fases presentes, se realizó mediante difracción de rayos X de bajo ángulo (FXRD), empleando radiación Cu-K $\alpha$ , filtro de Ni. El barrido fue realizado entre 20 y 70° con paso de 0.02° y 1 seg/paso.

**Tabla 1:** Nomenclatura de las muestras utilizadas en este trabajo para los diferentes tratamientos.

MUESTRAS	TRATAMIENTOS SUPERFICIALES
B7	Tratamiento de blastinado e inmersión en SBF por 7 días
BAPQ7	Tratamiento de blastinado, anodizado por plasma químico (APQ) e inmersión en SBF por 7 días.
BNa7	Tratamiento de blastinado, tratamiento alcalino, e inmersión en SBF por 7 días
BAPQNa7	Tratamiento de blastinado, anodizado por plasma químico (APQ), tratamiento alcalino e inmersión en SBF por 7 días.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se pueden observar imágenes obtenidas mediante MEB de la topografía superficial de las muestras “B”, “BAPQ”, “BNa” y “BAPQNa”, previo a su inmersión en SBF; como también sus respectivos espectros EDS. La muestra “B” presenta una severa modificación en su topografía superficial [7], con presencia en su superficie de partículas de fosfato de calcio remanentes de dicho tratamiento [17] (Figura 1a). La muestra “BAPQ” exhibe una capa porosa enriquecida en calcio y fósforo, provenientes del blastinado y del electrolito utilizado en el anodizado por plasma químico; los espectros EDS confirman la presencia de estos elementos. El tratamiento alcalino genera un hidrogel de titanato de sodio en la superficie del óxido de titanio; con fisuras que recorren toda la superficie (Figuras 1c y 1d). Estas fisuras resultan de la contracción de la capa de titanato de sodio formado sobre la superficie, debido a la deshidratación durante el secado.

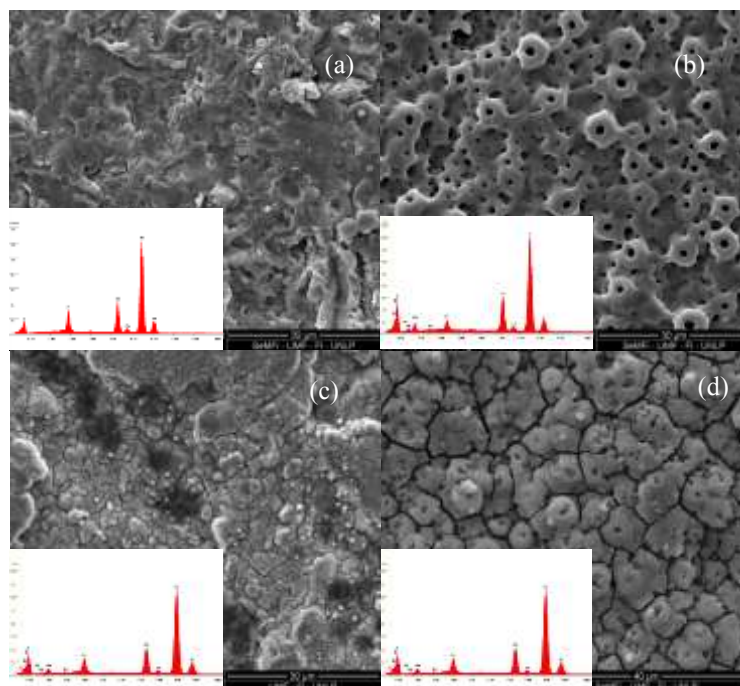


Figura 1: Imágenes SEM de las muestras tratadas superficialmente. (a) Muestra B, (b) Muestra BAPQ, (c) Muestra BNa y (d) Muestra BAPQNa.

Las características superficiales tales como rugosidad, composición química, hidrofiliidad, etc; juegan un papel importante en la interacción entre el dispositivo médico y el medio biológico a corto y a largo plazo [18]. El ángulo de contacto pone en evidencia el comportamiento hidrofílico o hidrofóbico de una superficie. Por tanto la hidrofiliidad de una superficie es uno de los factores que determina la biocompatibilidad de un biomaterial y es directamente dependiente de la energía superficial. Si la superficie de estudio presenta un ángulo de contacto  $\phi < 90^\circ$ , esta se considera hidrofílica; en cambio sí el ángulo de contacto formado por la gota de agua y la superficie es mayor a  $90^\circ$ , la superficie se considera hidrofóbica; y si el ángulo de contacto  $\phi$  es menor a  $20^\circ$  estaríamos en presencia de una superficie superhidrofílica [19]. En la Figura 2 se presentan las medidas de ángulo de contacto estático, la muestra “B” (Figura 2a) exhibe un ángulo de contacto de  $80,1^\circ$  resultando en una superficie con una moderada hidrofiliidad [20]. La muestra “BAPQ” (Figura 2c) presenta un ángulo de contacto de  $114,7^\circ$ , resultando en una superficie hidrofóbica [20]. Las muestras “BNa” y “BAPQNa” presentan ángulos de contacto de  $19,1^\circ$  y  $17,1^\circ$ , respectivamente, resultando en superficies muy hidrofílicas.

**Tabla 2.** Ángulo de contacto de las muestras tratadas superficialmente.

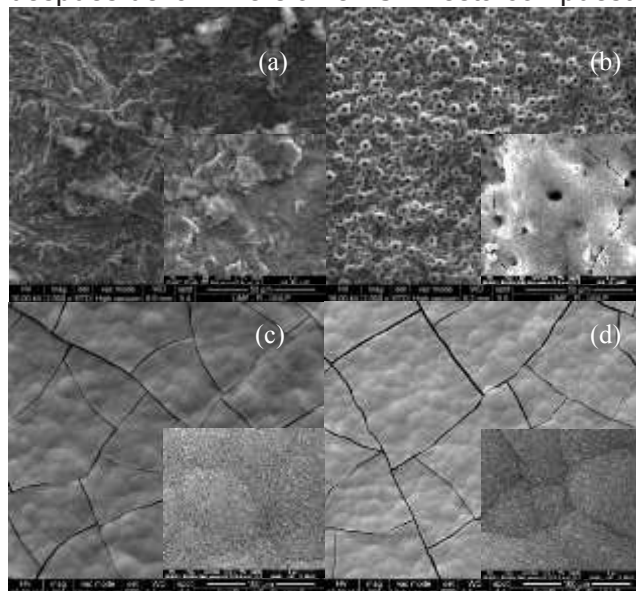
Muestra	Angulo de contacto ( $^\circ$ )
B	80
BAPQ	114,7
BNa	19,1
BAPQNa	17,1

En la Figura 3 se muestran la morfología superficial de las muestras B7, BAPQ7, BNa7 y BAPQNa7 obtenidas después de la inmersión en SBF durante 7 días; Las muestras “B7” y “BAPQ7” (Figuras 3a y 3b) no mostraron cambios en la morfología superficial luego de la inmersión en SBF. En las muestras “BNa7” y “BAPQNa7” (Figuras 3c y 3d), se evidencia la



presencia de precipitados esféricos formando una red porosa con partículas tipo agujas distribuidas homogéneamente con fisuración en toda la superficie. [21].

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos a partir de los espectros EDS, correspondiente a las muestras “BNa7” y “BAPQNa7”. Estos análisis indican que el precipitado obtenido después de la inmersión en SBF está compuesto por Ca y P.



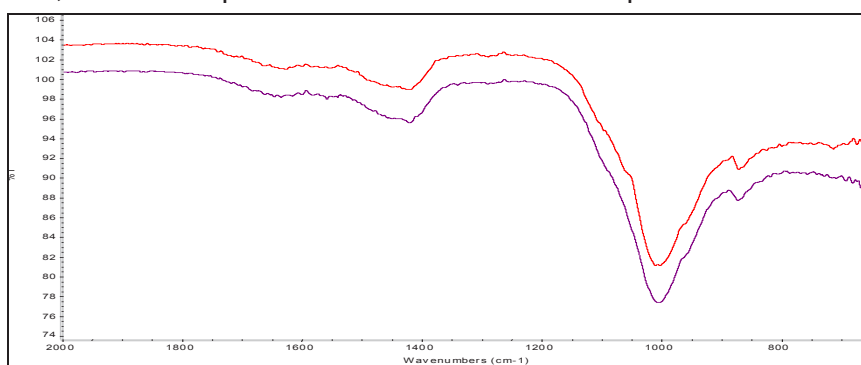
**Figura 3:** Imágenes SEM de las muestras ensayas en SBF, (a) Muestra B7, (b) Muestra BAPQ7, (c) Muestra BNa7, (d) Muestra BAPQNa7.

Tabla 3. Relación Ca/P después de la inmersión en SBF durante 7 días, en las muestras BNa7 y BAPQNa7.

Muestra	Ca (at%)	P (at%)	Ca/P
BNa7	22,49	15,31	1,47
BAPQNa7	24,50	15,92	1,54

En la Figuras 4 se presentan los espectros FTIR correspondientes a las muestras “BNa7” (rojo) y “BAPQNa7” (azul). Ambas presentan dos bandas anchas centradas; a 1423 y 1011  $\text{cm}^{-1}$  en la muestra BNa7 y a 1423 y 1008  $\text{cm}^{-1}$  en la BAPQNa7. También los espectros de estas muestras presentan una segunda banda de mayor intensidad, la cual está asociada a la contribución de grupos fosfatos con diferentes geometrías y entornos.

Asimismo, en estas dos muestras se presenta una banda muy intensa a 1008  $\text{cm}^{-1}$  y un hombro a 960  $\text{cm}^{-1}$  asignables a grupos fosfatos de hidroxiapatita [22]. Las señales a 1093, 1008 y 960  $\text{cm}^{-1}$ , indicaría la presencia de la misma en la superficie de la muestra.



**Figura 4.** Espectros ATR-FTIR de BNa7 (rojo) y BAPQNa7 (violeta) en la región 2000 – 650  $\text{cm}^{-1}$

Por otro lado, a partir de medidas de difracción de rayos X de bajo ángulo se verificó la presencia de hidroxiapatita en las dos muestras bajo estudio “BNa7” y “BAPQNa7”. En la Figura 6 se observan los picos de difracción correspondientes a la fase de hidroxiapatita en ambas muestras “BNa” y “BAPQNa7”; además se presentan los picos característicos del Titanio y del Rutilo (TiO<sub>2</sub>) propios del material de estudio.

Es necesario destacar que de la comparación de ambos espectros no se encuentran diferencias de las fases presentes en las superficies de las muestras ensayadas.

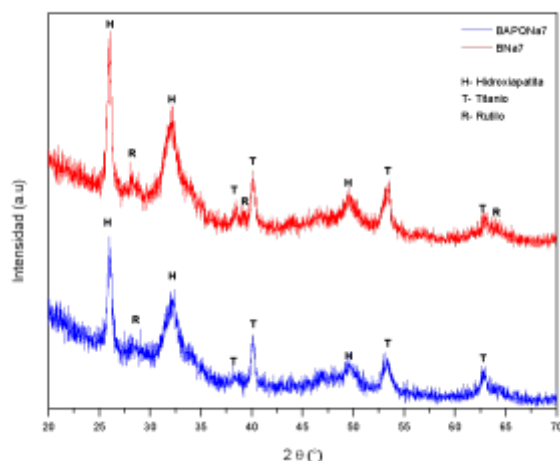


Figura 6. Difractogramas de las muestras “BNa7” y “BAPQNa7”.

## 5. CONCLUSIONES

El tratamiento alcalino en NaOH aplicado a las muestras de Ti Gr4 con diferentes condiciones superficiales generó variaciones en las superficies de tipo química y topográfica. Se produjeron disminuciones en los ángulos de contacto generando superficies superhidrofílicas, lo cual se considera promisorio, ya que es conocido que esta característica facilita la osteointegración entre el biomaterial y el medio biológico en los primeros estadios post-implantación. Del análisis de los resultados obtenidos de Difracción de Rayos X, FTIR y SEM; se concluye que el tratamiento en solución alcalina de NaOH genera superficies bioactivas, ya que acelera la formación de apatitas en las superficies de las muestras blastinizadas y blastinizadas con anodizado por plasma químico, cuando ellas son inmersas en SBF durante 7 días.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] G. BALASUNDARAM, T.J. WEBSTER, J. “A perspective on nanophase materials for orthopedic implant applications”. *Journal of Materials Chemistry*, v.16, n.16, pp. 3737–3745, Jul. 2006.
- [2] REIDENBACH F., “ASM Handbook Volumen 5”, ASM International Handbook Committee, 1996.
- [3] LE GUÉHENNEC L., SOUEIDAN A., LAYROLLE P. AND AMOURIQ Y., “Surface treatments of titanium dental implants for rapid osseointegration”, *Dental Materials*, v. 23, n. 7, pp. 844–854, Jul. 2007.
- [4] WENNERBERG A., ALBREKTSSON T., “Effects of titanium surface topography on bone integration: a systematic review”, *Clinical Oral Implants Research*, v. 20, n. 4, pp. 172-184, Sep.2009.
- [5] ARVIDSSON A., SATER B.A., WENNERBERG A. “The role of functional parameters for topographical characterization of bone-anchored implants”, *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, v.8, n.2, pp.70-76, Jul. 2006.

- [6] CHOI C.R., YU H.S., KIM C.H., LEE J.H., OH C.H., KIM H.W. AND LEE H.H., "Bone Cell Responses of Titanium Blasted with bioactive glass particles", *Journal of Biomaterials Applications*, v. 25,n.2, pp. 99–117, Aug. 2010
- [7] LEMOS, A., CERLIANI A., KANG,K., ECHARRI,J., LLORENTE,C., BILMES, P., SCARANO, N., BORASI,L., "Caracterización superficial y transversal de implantes dentales de titanio blastinizados y anodizados por plasma químico". In: *Actas del XI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica CIBIM 2013*, pp. 1108-1117, La Plata, Nov. 2013
- [8] WEI D Q, ZHOU Y, JIA D.C., WANG Y. M. "Effect of heat treatment on the structure and in vitro bio-activity of microarc oxidized (MAO) titania coatings containing Ca and P ions", *Surface and Coatings Tech-nology*, v. 201, n.21, pp. 8723–8729, Aug. 2007.
- [9] LI L H, KIM H W, LEE S H, KONG Y M, KIM H E. "Biocompatibility of titanium implants modified by microarc oxidation and hydroxyapatite coating", *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, v.73, n. 1, pp. 48-54, Apr. 2005.
- [10] PAITAL S R, DAHOTRE N B. "Calcium phosphate coatings for bio-implant applications: Materials, performance factors, and methodologies", *Materials Science and Engineering R: Reports*, v. 66, n. 1–3, pp. 1–70, Aug. 2009.
- [11] ISHIZAWA H, OGINO M. "Formation and characterization of anodic titanium oxide films containing Ca and P", *Journal of Biomedical Materials Research*, v.29, n.1, pp. 65-72, Jan 1995.
- [12] WEI D Q, ZHOU Y, WANG Y B, MENG Q C, JIA D C. "Structure and apatite formation of microarc oxidized TiO<sub>2</sub>-based films before and after alkali-treatment by various alkali concentrations", *Surface and Coatings Technology*, v. 202, n. 20, pp. 5012–5019, Jul. 2008.
- [13] JONÁSOVÁ L , MÜLLER FA , HELEBRANT A , STRNAD J , GREIL P. "Hydroxyapatite formation on alkali-treated titanium with different content of Na<sup>+</sup> in the surface layer", *Biomaterials*, v. 23, n.15, pp. 3095–3101, Aug. 2002.
- [14] NISHIGUCHI S., FUJIBAYASHI S., H.M. KIM, KOKUBO T., NAKAMURA T. "Biology of alkali- and heat-treated titanium implants", *Journal of Biomedical Materials Research: Part A*, v.67, n.11, pp. 26–35, Oct. 2003.
- [15] KIM S., JEONG Y., CHOE H., W BRANTLEY.A. "Morphology change of HA films on highly ordered nanotubular Ti–Nb–Hf alloys as a function of electrochemical deposition cycle". *Surfaces and Coating Technology*, v. 259, Part B, pp. 281–289, Nov. 2014.
- [16] *Implants for surgery - In vitro evaluation for apatite-forming ability of implant materials, ISO 23317:2012.*
- [17] HAN Y., HONG S.H., XU K.W. "Structure and in vitro bioactivity of titania-based films by micro-arc oxidation", *Surface and Coatings Technology*, v. 168, n. 2–3, 22, pp. 249–258, May 2003.
- [18] GITTENS R.A., SCHEIDELER L., RUPP F., HYZY S.L., GEIS-GERSTORFER J., SCHWARTZ Z., BOYAN B.D. "A review on the wettability of dental implant surfaces II: Biological and clinical aspects", *Acta Biomaterialia* , v. 10, pp. 2907–2918, Apr. 2014.
- [19] VOGLER E.A. "Structure and reactivity of water at biomaterial surfaces", *Advances in Colloid and Interface Science*, v.74, n.1-3, pp. 69–117, Feb. 1998.
- [20] RUPP F, GITTENS R.A, SCHEIDELER L, MARMUR A., BOYAN B.D., SCHWART Z., GEIS-GERSTORFER J. "A review on the wettability of dental implant surfaces I: Theoretical and experimental aspects", *Acta Biomaterialia*, v.10, n.7, pp. 2894–2906, Jul. 2014.
- [21] ZHANGA P., ZHANG Z., LI W., ZHUA M. "Effect of Ti-OH groups on microstructure and bioactivity of TiO<sub>2</sub> coating prepared by micro-arc oxidation", *Applied Surface Science*, v.268, pp.381–386, March 2013.
- [22] SROKA-BARTNICKA A., BORKOWSKI L., GINALSKA G., ŚLÓARCZYK A., KAZARIAN S.G. "Structural transformation of synthetic hydroxyapatite under simulated in vivo conditions studied with ATR-FTIR spectroscopic imaging", *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, v.171, pp.151-161, Aug. 2016.

## COMPARACIÓN DE TÉCNICAS FOTOGRAMÉTRICAS DE BAJO COSTO PARA EL RELEVAMIENTO DE PIEZAS MECÁNICAS

Defranco, Gabriel\*; Fuertes, Laura\*; Gavino, Sergio\*; Lopresti, Laura\*; Lara, Marianela\*; Barba, Salvatore \*\*

\*UIDET Grupo de Ingeniería Gráfica Aplicada  
Cátedra Gráfica para Ingeniería y Sistemas de Representación "C"  
Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata  
AV. 1 y 47 1900 - La Plata, Argentina  
lfuertes@ing.unlp.edu.ar

\*\*Laboratorio Modelli, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Salerno, Italia

### INTRODUCCIÓN

La ingeniería inversa, como su nombre indica, es el camino opuesto al que se sigue en un proceso proyectual de diseño. En este caso, existiendo físicamente el elemento, es relevado por sistemas tridimensionales como la fotogrametría y los escáneres como describe Valle Melón (2006:70) [1] los que se caracterizan porque la posición de un punto en el espacio es localizada mediante sistemas de coordenadas cartesianas o polares. Una vez obtenido digitalmente el modelo es empleado como insumo comparativo con respecto al original del cual se parte o fabricado a partir de la nube de puntos o malla obtenida; puede constituirse también en una base documental, ya sea para acciones divulgativas o comunicacionales de lo relevado o como inicio de nuevos trabajos proyectuales. En este sentido, en la industria, el relevamiento de piezas mecánicas es un procedimiento habitual que se lo realiza, entre otros propósitos, para reconstruir piezas deterioradas o como modo de iniciar una documentación preliminar a la confección de planos.

En el campo educativo, esta posibilidad que presentan las técnicas fotogramétricas, permiten que piezas mecánicas, estudiadas y clasificadas [2] y que forman parte de un acervo de insumos didácticos para la enseñanza del lenguaje gráfico de carácter técnico, propio de la formación de grado de futuros Ingenieros, sean registradas mediante cámaras fotográficas y siguiendo rigurosamente un procedimiento de captura, se obtenga documentación digital con buenos rangos de precisión.

La técnica fotogramétrica multi-imagen se ha hecho más accesible y de bajo costo debido a los avances tecnológicos y su vinculación con métodos propios de la visión artificial [3]; con un procedimiento de captura no tan riguroso y tomando muchas fotografías, se logra con celeridad arribar a modelos digitales de precisión aceptable. Esta conjunción ha dado lugar a la fotogrametría *Structure from Motion (SFM)* y *Shape from Silhouette (SFS)* cuyo potencial radica en la resolución automática de la posición de cada una de las fotografías sin necesidad de objetivos o puntos de interés reconocibles, usando un procedimiento de ajuste de haz redundante e iterativo tal como plantean autores como Snavely, entre otros.

Con este marco, la Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia - Grupo de Ingeniería Gráfica Aplicada (UIDET-GIGA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina, es que establece desde el año 2009 un fluido contacto con el *Dipartimento di Ingegneria Civile* de la *Università degli Studi di Salerno*, Italia, el cual ha derivado en instancias de capacitación, intercambio de investigadores, pasantías y becas y la puesta a disposición por parte de la entidad italiana de instrumental específico para el abordaje de esta temática, lo cual ha permitido que desde el 2012 se desarrolle el proyecto "Técnicas de relevamiento no convencionales para la representación gráfica de naturaleza técnica. Aplicaciones en el campo de la ingeniería inversa, el diseño industrial y la conservación de patrimonio (Parte I y II)" [4].

## SELECCIÓN DE PIEZAS

Como ya se ha señalado, el relevamiento de piezas mecánicas es una práctica habitual, que generalmente se realiza mediante representaciones gráficas en sistema de Monge o perspectivas denominados croquis, donde prevalece el dibujo a mano alzada y proporcionado, a partir de la lectura e interpretación del elemento. Este tipo de representación gráfica pese a su carácter de boceto, deberá dar cuenta lo más acabadamente posible de ese material real, ya que con los datos de esa imagen y sus dimensiones, se podrá realizar el consiguiente plano con algún programa específico de CAD.

Dentro de lo que concierne a instancias pedagógicas, el croquis de pieza es una práctica fundamental, pero para que dichos modelos reales se conviertan en un insumo didáctico que propicie aprendizajes significativos la UIDET-GIGA ha compilado y clasificado las piezas que forman parte de su acervo, atendiendo a su complejidad morfológica [2] [5], según un criterio de dificultad creciente. Esta clasificación ha resultado un primer punto de partida para la selección de piezas para su tratamiento fotogramétrico.

Las piezas seleccionadas se presentan en la Tabla 1 con una breve caracterización morfológica.

Selección de piezas mecánicas				
1-21-1	2-64-1	2-83-1	4-14-1	4-19-1
				
Pieza de revolución de baja complejidad y agujero cilíndrico pasante central	Pieza simétrica de mediana complejidad, con morfologías de revolución y gran agujero transversal	Pieza de revolución con base con tres agujeros cilíndricos pasantes y gran agujero cilíndrico central	Pieza de revolución con base con tres agujeros cilíndricos pasantes y gran agujero cilíndrico central	Pieza simétrica con sectores de revolución con ejes oblicuos a la base.

Tabla 1 - Imágenes fotográficas de las piezas mecánicas seleccionadas

A los efectos del presente trabajo se ha considerado la documentación de dos de estas piezas, seleccionándolas por la predominancia del eje vertical sobre las otras dimensiones (pieza 2-64-1 y pieza 4-14-1 de Tabla 1).

## MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se presentarán la toma de datos y una breve caracterización de los diferentes software empleados.

### Fotogrametría 'estereoscópica': MENCI SOFTWARE

Esta tecnología involucra no sólo un software propietario sino que además tiene hardware específico. Consta de una cámara digital réflex Nikon D100, un objetivo de 28 mm calibrado, un trípode profesional con una regla calibrada y dos aplicaciones: el Zscan, basado en el análisis multifocal de la imagen y el Z-Map. El elemento que asegura una captura de eje paralelo es la regla calibrada. La misma mide 900 mm de largo y sobre ella se desliza el cabezal sobre el que se fija la cámara fotográfica. Las diferentes tomas se realizan por tripletas (tres fotografías) y luego se completa con la cantidad de tripletas necesarias para incluir toda la información que se necesita relevar [6], Figura 1.



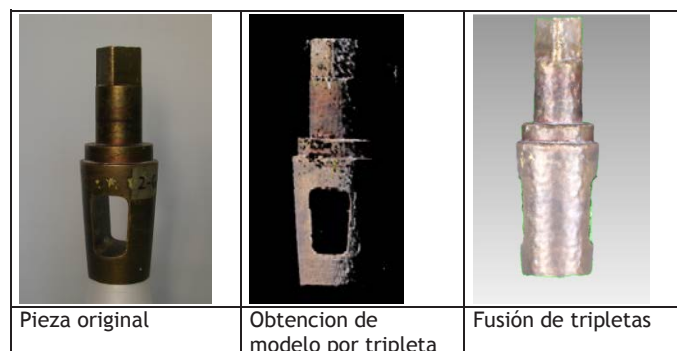


Figura 1 – Secuencia seguida empleando MENCİ SOFTWARE

### Fotogrametría SFM y SFS

#### 123D Catch

El software *123D Catch* es una aplicación fotogramétrica de la empresa *Autodesk*. Se trata de un asistente de escena de descarga gratuita y forma parte de una serie de aplicaciones que contemplan el trabajo con modelos 3D hasta la fabricación de los mismos por planos seriados.

La cámara fotográfica utilizada para esta experiencia fue una SONY DSC-H2. La toma de fotografía es de eje convergente y se logra rodeando la pieza para realizar las diferentes capturas. El resultado que se obtiene es un único modelo de malla con textura que se exportó en formato OBJ [7], Figura 2.



Figura 2 – Secuencia seguida empleando 123D Catch

#### 3DSOM

La aplicación *3DSOM* es un software propietario que genera modelos 3D a partir de imágenes múltiples. Para esta experiencia se utilizaron las cámaras SONY DSC-H2 y SONY DSC-W110. La toma de fotografía es también de eje convergente y se logra girando la pieza luego de cada fotografía capturada. La pieza elegida se coloca sobre un soporte en el centro de una matriz radial de puntos provista por el software. Se deben tomar entre 16 y 30 fotografías girando la pieza, en dos series con distinto ángulo, para que el software pueda procesar las imágenes en función de los puntos de la matriz de referencia que acompaña el giro del objeto. Es importante aclarar que se empleó una versión de demostración y que como en el caso anterior, los modelos 3D generados se exportaron en formato OBJ [8], Figura 3.

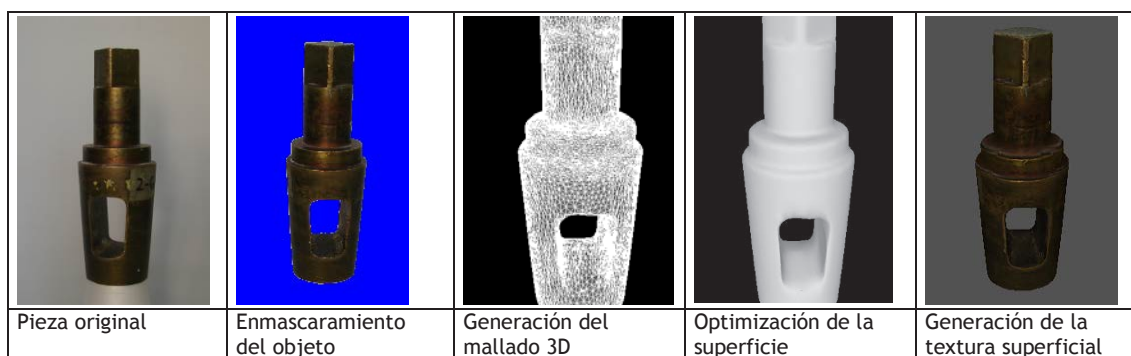


Figura 3 – Secuencia seguida empleando 3DSOM

### Agisoft Photoscan

Este software es propietario. Su tecnología de reconstrucción 3D a partir de fotografías está basada en la tecnología multi-imagen. Opera con fotografías arbitrarias y en condiciones controladas y no controladas. Las fotografías se pueden tomar de cualquier posición y se debe considerar que el aspecto a documentar sea visible en al menos dos fotos. Tanto la alineación de la imagen como la reconstrucción del modelo 3D están totalmente automatizadas. Las fotografías son las mismas que se han utilizado con 123D Catch. Los resultados obtenidos son exportados en formato OBJ, Figura 4.



Figura 4 – Secuencia seguida empleando Agisoft Photoscan

### Blender y Geomagic

Blender es un software libre de modelado 3D, iluminación, renderizado, animación y creación de entornos de juegos. En general, para el trabajo con mallas se puede hacer retopología y generar una nueva malla sobre la base de una anterior y de esta manera, mejorar su configuración. En esta experiencia no se ha hecho retopología, sólo se ha utilizado esta aplicación para la toma de medidas sobre la malla obtenida por fotogrametría.

Geomagic Studio es un software propietario para el procesamiento de nubes de puntos y el tratamiento de mallas obtenidas por cualquiera de las técnicas de documentación. Para esta experiencia se han utilizado las herramientas de generación de sólidos primitivos paramétricos para la obtención de medidas de la malla original.

### PROCEDIMIENTO COMPARATIVO Y RESULTADOS

Debido a la dificultad que presenta tomar dimensiones en una malla obtenida por cualquiera de los procedimientos de documentación mencionados y para obtener más resultados para comparar, se utilizaron dos estrategias para la verificación de la precisión obtenida.

A- Medición utilizando la herramienta *Iteractive ruler* de Blender sobre la malla obtenida: luego de importar el modelo se escala, se georreferencia con el sistema de coordenadas

cartesianas y se eligen dos puntos sobre la malla para determinar la medida, esto se puede observar en la Figura 5.

B- Medir el modelo paramétrico obtenido por el reconocimiento de figuras geométricas parametrizadas [9]: luego de importar el modelo a Geomagic Studio, se escala y se georreferencia. Posteriormente se selecciona qué parte de la malla corresponde a un cuerpo geométrico primitivo, por ejemplo cilindro, el software calcula el cilindro óptimo para esa selección e informa el diámetro y altura del mismo [9], Figura 6.

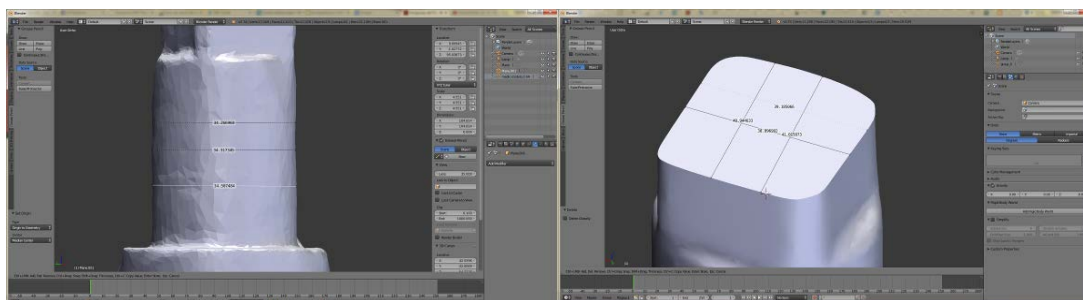


Figura 5 – Verificación de medidas (Blender)

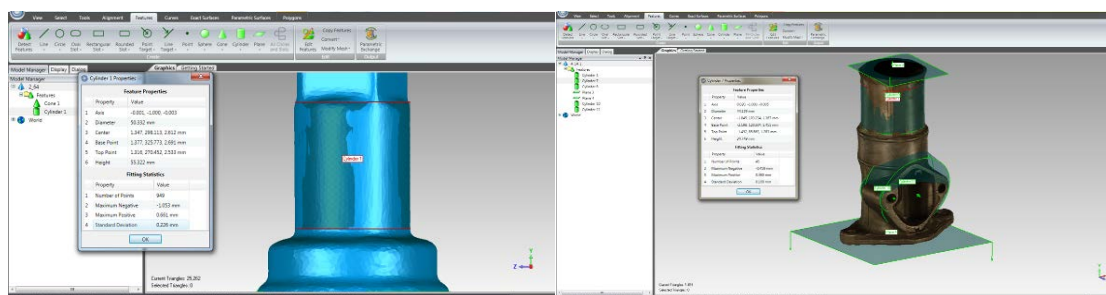


Figura 6 – Verificación de medidas (Geomagic Studio)

En la Tabla 2 y Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de ambos procedimientos utilizados para la medición del modelo digital. Las medidas de referencia fueron tomadas según los tres ejes cartesianos para permitir aproximar un resultado de precisión respecto de ellos. Las medidas están dadas en milímetros.

	Medidas reales [mm]	3DSom A	3DSom B	PhotoSc A	PhotoSc B	123D A	123D B	Menci A	Menci B
1	26.50	26.60 26.61 27.10	26.60 26.60 26.60	26.85 26.65		26.15 26.17	26.00 25.90 25.42	25.59 25.69 25.36	
2	26.80	27.87 27.23 27.16	26.82 26.61 26.90	27.15 27.22 27.34	27.23 27.12	26.35	25.61 26.17		
3	34.50	35.38 35.60 35.74	35.23 34.31	34.19 34.25 34.28	34.14 33.76 34.66	34.26 34.31 34.50	35.35 34.53 35.06	33.81 33.86 34.12	34.20 34.06 34.09
4	94.00	91.28 91.49	92.67 90.27	92.69 92.95 92.79	94.50 94.51	95.03 94.77	94.70	94.28 94.37 94.48	94.27 94.50 94.10
	Precisión +/-	+1.24 -2.72	+3.73 -0.19	+1.31 -0.54	+0.51 -0.74	+ 1.03 - 0.45	+0.85 -1.19	+0.48 -1.14	+0.50 -0.44

Tabla 2 - Detalle de mediciones realizadas en el modelo digital (pieza 2-64-1)

	Medidas reales [mm]	3DSom A	3DSom B	PhotoSc A	PhotoSC B	Menci A	Menci B
1	61.30	60.65 60.11 60.68	59.20 60.20 60.08		60.15	61.69 61.36 61.14	61.90 60.27
2	44.40	44.57 44.41 44.27	44.40 44.12 44.06	42.38 42.20	42.39 42.40	43.20 43.60	43.50 43.53 43.91
3	125.25	125.78 125.53 125.84	124.33 123.96	126.98	122.31 123.40	126.61 126.49	124.26
	Precisión +/-	+0.59 -1.19	-2.10	+1.73 -2.20	-2.94	+1.36 - 1.20	+0.60 -1.03

Tabla 3 - Detalle de mediciones realizadas en el modelo digital (pieza 4-14-1)

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Analizando las Tablas 2 y 3 se puede observar que la diferencia de los datos obtenidos con Menci respecto de los obtenidos con las otras técnicas fotogramétricas SFM y SFS indica que el procedimiento de toma de fotografías controlado y con hardware propietario, aunque no está considerado dentro de concepto de bajo costo, da resultados más precisos pero no son notablemente diferentes al resto de los valores mostrados. En la Tabla 2 se puede observar que las medidas tomadas que se muestran en el ítem 4 obtenidas con 3DSOM, da valores demasiado alejados al valor real. Esto podría atribuirse a la cámara fotográfica utilizada. Los valores presentados en la Tabla 3, con igual procedimiento y software, son más acordes a la realidad. Se debe destacar aquí que la exactitud geométrica de la malla obtenida con 3DSOM, respecto de los modelos obtenidos con las demás aplicaciones, es mucho menor ya que esta aplicación resuelve con la textura la morfología que no puede crear.

En la Tabla 3 se observa que, los datos obtenidos del modelo procesado con Agisoft Photoscan con el método A y B, están en el orden de los 3 mm. Esto podría indicar que el proceso no fue realizado adecuadamente siendo que el mismo procedimiento de la Tabla 2 tiene buenos resultados.

En las capturas de las fotografías es necesario reconocer los principios fotogramétricos tradicionales para un exitoso resultado en el menor tiempo posible. Si bien las técnicas SFM y SFS demuestran fortalezas [10], incluso con pocas imágenes, la calidad de los datos dimensionales de la geometría está claramente ligada a la calidad de imagen capturada y a la superposición de información y redundancia en cada toma. Es fácil obtener datos incorrectos si nos encontramos con geometrías como agujeros o concavidades, donde la luz no llega y por ende la fotografía no lo ve.

En necesario seguir trabajando en esta línea para procurar resultados de precisión más cercanos a los deseados. Nuevos procedimientos son necesarios de ser investigados. En cuanto a las piezas seleccionadas para su estudio, en este trabajo se ha comparado aquellas dos de características morfológicas similares, es decir, piezas con predominancia del eje vertical en su configuración; se espera completar los relevamientos de los otros tres casos, con especial atención en la pieza 4-19-1 por su particularidad geométrica.

## REFERENCIAS

- [1] Valle Melón, J.M. (2006) "La medida y representación del patrimonio: alternativas y criterios de selección". Berceo, nº 151, pp. 63-85, ISSN 0210-8550, <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2667951> (24/08/2015).
- [2] Fuertes, L.; Lopresti, L.; Gavino, S.; Ristevich, A. Defranco, G. (2008) "De los sistemas CAD al modelado paramétrico: una experiencia de innovación en la enseñanza de dibujo tecnológico en ingeniería", en Actas del VI Congreso Docentes de Expresión Gráfica en Arquitectura y Areas Afines, EGRAFIA 2008 San Juan, Argentina. ISBN 978-950-605-579-0.
- [3] Micheletti, N.; Chandler, J.; Lane, S. (2015) "Structure from Motion (SfM) Photogrammetry". Geomorphological Techniques, Chap. 2, Sec. 2.2, ISSN 2047-0371,

[http://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/geom\\_tech\\_chapters/2.2.2\\_sfm.pdf](http://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/geom_tech_chapters/2.2.2_sfm.pdf)(20/8/2015).

[4] Proyectos I171 (2012-2014) / I190 (2014-2017), acreditados dentro del Programa Nacional de Incentivos, Secretaría de Políticas Universitarias, Ministerio de Educación de Argentina.

[5] Fuertes, L.; Gavino, S.; Lopresti, L.; Defranco, G. (2009) “Aspectos de la forma en dibujos de aplicación técnica”, en Actas VII Congreso Nacional y IV Congreso Internacional – SEMA 2009, Tucumán, Argentina. ISBN 978-987-25375-0-0.

[6] Defranco, G.; Fuertes, L.; Gavino, S.; Lopresti, L.; Lara, M.; Barba, S.(2012) “Nuevas técnicas de relevamiento para aplicaciones de ingeniería inversa”, en Actas III CAIM – Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica y XXV reunión científica académica del FoDAMI, Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-987-1063-94-9.

[7] Lara, M.; Lopresti, L.; Defranco, G. (2015) “Relevamiento fotogramétrico de bajo costo para piezas mecánicas”. Ponencia presentada en XXIII Jornadas de Jóvenes Investigadores (AUGM), Universidad Nacional de La Plata, Argentina.



## EL DIBUJO TECNOLÓGICO EN LAS ESCUELAS TÉCNICAS: APORTES PARA LA REVISIÓN DE LAS PRÁCTICAS DE ENSEÑANZA

Gavino, Sergio\*; Fuertes, Laura\*; Lopresti, Laura\*; Lara, Marianela\*; Defranco, Gabriel\*

\*UIDET Grupo de Ingeniería Gráfica Aplicada  
Cátedra Gráfica para Ingeniería y Sistemas de Representación “C”  
Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata  
AV. 1 y 47 1900 - La Plata, Argentina  
lfuertes@ing.unlp.edu.ar

### INTRODUCCIÓN

En Argentina, históricamente, los planes de estudio de las escuelas secundarias técnicas incluyeron al Dibujo Técnico como parte del conjunto de asignaturas. Más allá de los distintos nombres que ha tomado, la enseñanza del dibujo de naturaleza técnica (dibujo técnico, lenguaje tecnológico, dibujo tecnológico, sistemas de representación, etc.), se evidencia un núcleo estructurante de contenidos que erige al dibujo tecnológico como el lenguaje propio de la tecnología cuyos ejes son “*los procesos de representación y modelización ... para comprender los lenguajes y modelos técnicos para interpretar y producir representaciones y descripciones en procesos o productos*” [1].

En la Provincia de Buenos Aires, el Diseño Curricular para la Nueva Secundaria implementado a partir del año 2007, está estructurado en dos ciclos: uno básico y otro superior y prescribe dos instancias de aproximación a los contenidos centrales de los sistemas de representación:

- En el ciclo Básico, a través de *Lenguaje Tecnológico*, distribuido en 3 años, se presentan los sistemas de representación entendidos como instrumentos lógico-formativos propios de la tecnología.
- En el ciclo Superior, *Dibujo Tecnológico*, correspondiente al 4º año de la Formación técnico – específica [2], se presenta un espacio de especificación de los sistemas de representación según la orientación (construcciones, mecánica, electromecánica, electrónica, etc.).

Como ejemplo de los contenidos mínimos prescriptos se pueden citar los correspondientes a *Dibujo Tecnológico* del ciclo superior:

*Sistemas de Representación: Planos de proyección. Desplazamiento de los planos de proyección. Triedro fundamental y principal. Concepto de tres dimensiones. Sistemas de proyecciones - IRAM, ISO. Normas y Simbología de Representación: Estudio y aplicación de normas. Símbolos de representación utilizados en esquemas de circuitos y planos (eléctricos, mecánicos, neumáticos, electrónicos, etc.). Interpretación de planos de instalaciones. La Representación Asistida por Computadora: CAD. Principios básicos. Nociones y conceptos. Equipamiento necesario y opcional. Software relacionado.*

Del análisis de los contenidos, es posible detectar núcleos temáticos que subsisten independientemente del desarrollo de nuevos enfoques para la disciplina y de la incorporación de nuevos contenidos:

- *El sistema Monge o sistema de proyecciones ortogonales, resuelto según normas y enriquecido con los recursos de cortes y secciones, acotamiento y simbología específica.*
- *La Representación Asistida por Computadora.*

En síntesis, a través de estos núcleos temáticos se propicia la adquisición de competencias que permitirán a los alumnos leer y realizar representaciones gráficas de carácter técnico, elaboradas tanto a mano como mediante diseño asistido por computadora en dos dimensiones o a través del modelado tridimensional y empleando sistemas de representación convenidos por normas internacionales o nacionales. Es entonces que, la metodología áulica para enseñar los saberes propios del dibujo tecnológico, ha sido y es permanentemente objeto de revisión, con la idea de consolidar un espacio de aprendizajes

significativos, de aplicación no sólo en el trayecto del Ciclo Básico, sino también en el Ciclo Superior.

Por otro lado, es importante mencionar que la Unidad de Investigación, Desarrollo y Transferencia Grupo de Ingeniería Gráfica Aplicada (UIDET-GIGA), de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), desde su formación en el año 2005, ha estimulado, entre otros ejes de trabajo, el denominado “Eje articulación académica con otras instituciones” con el propósito de ofrecer capacitación y perfeccionamiento a docentes de escuelas técnicas e institutos superiores. En este sentido son numerosas las instancias de articulación que esta UIDET ha implementado:

- Año 2008-2012: *Taller de Capacitación de Actualización en Sistemas CAD: del dibujo métrico al modelado paramétrico*. Destinatarios: Docentes de Escuelas Técnicas de la Provincia de Buenos Aires, convocados por la Federación de Educadores Bonaerenses,
- Año 2009: *Taller Modelos digitales para la enseñanza de tecnología, actualización en sistemas CAD*. Destinatarios: Docentes de nivel medio y terciario y alumnos de nivel terciario.
- Año 2013: *Taller Técnicas avanzadas de relevamiento: fotogrametría digital y láser escáner*. Alumnos del Profesorado de ETP del ISFD N° 17.
- Año 2014: *Jornada El croquis y las técnicas actuales de relevamiento: fotogrametría y láser escáner* en el marco de la Caravana Gráfica II Edición en EGraFIA 2014.

Desde este marco, esta comunicación presenta el ciclo de talleres *El Dibujo Tecnológico en las Escuelas Técnicas: Aportes para la Revisión de las Prácticas de Enseñanza*. Esta propuesta, desarrollada por la UIDET GIGA, fue seleccionada como parte del Programa Nacional de Formación Permanente (PNFP) “Nuestra Escuela” del Ministerio de Educación de la Nación en acuerdo con la UNLP que se configura como una de las instituciones formadoras participantes.

PNFP “Nuestra Escuela” contempla la implementación de instancias de formación para todas las jurisdicciones educativas del país, previendo integralmente la formación individual y colectiva de los docentes analizando, sistematizando y comunicando sus prácticas.

La propuesta se encuadra en el eje Tecnologías de Representación del Componente II del Programa y tiene como propósitos centrales contribuir a la enseñanza del dibujo tecnológico en las escuelas técnicas favoreciendo la revisión de los contenidos centrales y las estrategias de enseñanza.

## METODOLOGÍA

Se realizó una convocatoria a docentes de tecnología del nivel medio y superior y a alumnos del nivel superior de carreras tecnológicas de institutos superiores de formación docente con el objeto de propiciar:

- la revisión de los contenidos centrales para la enseñanza del dibujo tecnológico con el propósito de asegurar su validez en el desarrollo de habilidades “*que se ponen en juego en la dinámica profesional y que están ligados a problemáticas del ejercicio profesional en contextos socio – productivos específicos*” [2].
- la incorporación de los sistemas CAD atendiendo a la evolución de los mismos su impacto en los procesos de diseño, procesos de producción y control [3].
- las estrategias de enseñanza aprendizaje del dibujo tecnológico orientadas al desarrollo de capacidades para la lectura, interpretación y realización de representaciones gráficas de carácter técnico [4].
- la integración de las TIC en los procesos de enseñanza-aprendizaje del dibujo tecnológico con el objeto de enriquecer el repertorio de recursos didácticos del docente de tecnología.

El recorrido que se propuso se ajustó a las especificidades disciplinares de los asistentes teniendo en cuenta la diversidad de orientaciones de la Formación Técnica Secundaria (mecánica, electromecánica, construcciones, etc.) [5] [6].

Se previó un acompañamiento no presencial a través de aulas virtuales donde los participantes no sólo pudieron acceder al material trabajado en los encuentros, sino que

además se propusieron temas de discusión y debate favoreciendo el intercambio de ideas y experiencias.

Como cierre se realizó un trabajo final integrador donde los asistentes desarrollaron un propuesta de enseñanza contextualizada en un espacio curricular de la Escuela Técnica.

## DESARROLLO

Se realizaron 2 talleres en 8 encuentros quincenales con el objeto de brindar herramientas para reflexionar la revisión de los contenidos centrales para la enseñanza del dibujo tecnológico y la incorporación de los sistemas CAD atendiendo a la evolución de los mismos, su impacto en los procesos de diseño, procesos de producción y control. A continuación se detallan los contenidos trabajados en cada taller:

### Taller 1

Revisión y actualización disciplinar de los contenidos centrales de los Sistemas de Representación: el sistema Monge, principios generales del sistema diédrico, sistema europeo y americano, tipos de líneas, tipos de vistas, cortes y secciones y acotamiento. Axonometrías. Oblicuas. El lenguaje gráfico normalizado: uniones roscadas, resortes, soldaduras, cañerías. El dibujo mecánico y el dibujo civil como campos de aplicación generales [7].

### Taller 2

Evolución de los Sistemas CAD/CAM/CAE y CNC. CAD: modelado paramétrico, piezas, ensambles y mecanismos. Simulación de movimiento. Modelos 3D a partir del plegado de chapas. CAM: generación virtual del proceso de fabricación, operaciones y estrategias de mecanizado. Generación de código G para una máquina de CNC. Simulaciones.

Durante el transcurso de las actividades se trabajó tanto con cuestionarios tipo encuesta, para indagar sobre algunas condiciones de enseñanza-aprendizaje habituales, como con clases expositivas para acordar contenidos conceptuales, casos problemas para debatir y proponer estrategias áulicas específicas y plenarios como modalidad para el intercambio y debate de puntos de vista. Figuras 1 y 2.



Figura 1. Trabajo en grupo



Figura 2. Exposición de trabajo en plenario

La mayoría de los docentes intervinientes son docentes en actividad en escuelas de enseñanza técnica y ante la consulta sobre cuáles son las dificultades habituales con las que se encuentran, surgieron las siguientes: la edad y el compromiso con la asignatura; la falta de madurez, atención e interés, el tiempo dedicado a la tarea, cuestiones relativas al equipamiento taller-aula, dificultades en la comprensión de texto y en el abordaje de las problemáticas desde distintos ángulos, tiempos de aprendizaje distintos, que se interprete la utilidad del dibujo.

En cuanto a la consulta sobre qué los había motivado a inscribirse en el programa, la mayoría expresó su interés en la capacitación sobre los programas CAD y actualización de herramientas a utilizar en la vida profesional. También se manifestó interés en las herramientas didácticas para un mejor proceso de enseñanza-aprendizaje de la representación 3D y en técnicas de evaluación.

A modo de ejemplo y para ilustrar algunos de los temas que motivaron instancias de debate, se presenta en la figura 3 un caso resuelto en Monge biplano o diédrico, a partir de la figura 4 y otro caso en la figura 5, a partir de la lectura e interpretación de la figura 6.

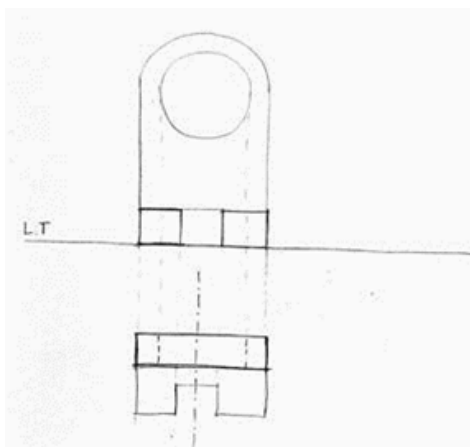


Figura 3. Imagen realizada durante el curso.

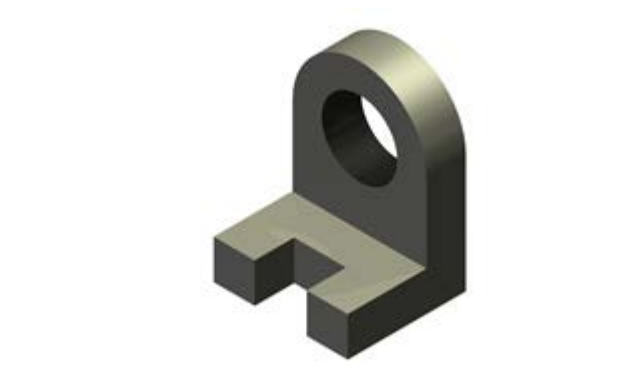


Figura 4. Imagen 3D modelada por la UIDET-GIGA para la actividad del curso.

En la figura 3, se observa que uno de los docentes participantes elaboró la imagen asignando mayor grosor en algunas de las líneas de contornos visibles. Ante la consulta sobre lo realizado, manifestó que es la estrategia que le resulta conveniente para que alumnos de 12 ó 13 años, que se inician tanto en el colegio secundario, como en el aprendizaje de este tipo de lenguaje, comprendan qué sector de lo representado se encuentra sobre la cara frontal o anterior o sobre la cara superior de la pieza representada.

De esta breve apreciación y en función a otras que salieron durante la instancia de debate, se llegó a la conclusión que en algunas ocasiones prevalece en las escuelas secundarias y especialmente en lo correspondiente al Ciclo Básico y a las asignaturas de Lenguaje Tecnológico, una predominancia de estrategias para consolidar la internalización del sistema de representación estudiado y no tanto en los aspectos discursivos de la imagen, en tanto su carácter de documentación técnica, como es la aplicación de tipos de línea según norma vigente; situación que en cambio sí se observa en el Ciclo Superior, donde la asignatura Dibujo Tecnológico, correspondiente al 4º año de la Formación Técnica aborda la problemática de la representación más relacionada a las orientaciones con las que egresará el alumno como construcciones, mecánica, electromecánica, etc.

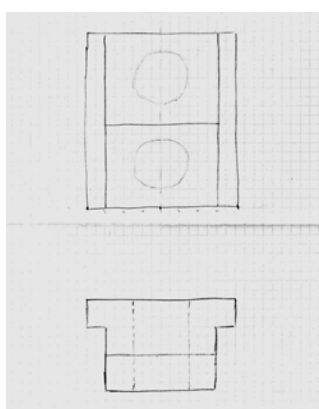


Figura 5. Imagen realizada durante el curso.

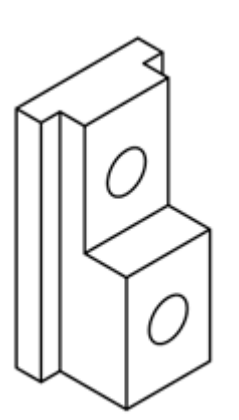


Figura 6. Imagen elaborada por la UIDET-GIGA para la actividad del curso.

En la figura 5 se observa otro caso tratado durante los encuentros. También es una representación en Sistema Monge Biplano, a partir de la lectura de la imagen que aparece en la figura 6.

En este segundo caso, se observa que si bien la representación es correcta, no se utilizó la vista anterior más significativa, situación que al ser comentada en instancia de plenario llevó a reflexionar que, en muchas ocasiones, se hace una lectura no tan profunda del elemento a representar y que la respuesta gráfica es un poco literal de la imagen leída. En tal sentido, se llegó a la conclusión sobre la importancia de la selección de las imágenes que hace el docente y cómo éstas, inciden en el tipo de respuesta del alumno.

Finalmente, en un tercer caso, se trabajó la lectura morfológica a partir de piezas mecánicas provistas por los capacitadores, haciendo hincapié en las volumetrías básicas que las componen y cómo pueden ser descriptas. Esta tarea mostró como resultado, que algunos de los docentes participantes resolvieron gráficamente su análisis y otros, en cambio, elaboraron un breve relato, marcando así diferentes soluciones discursivas. Figuras 7, 8 y 9.

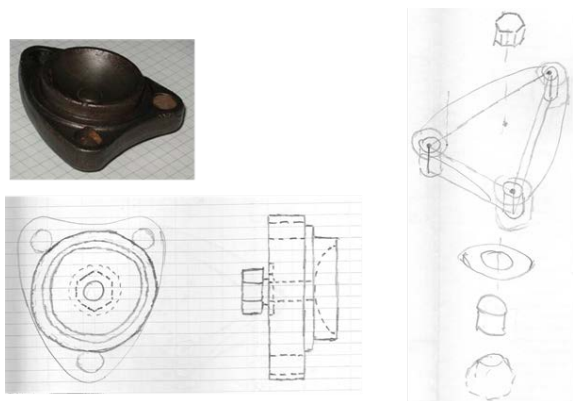


Figura 7.

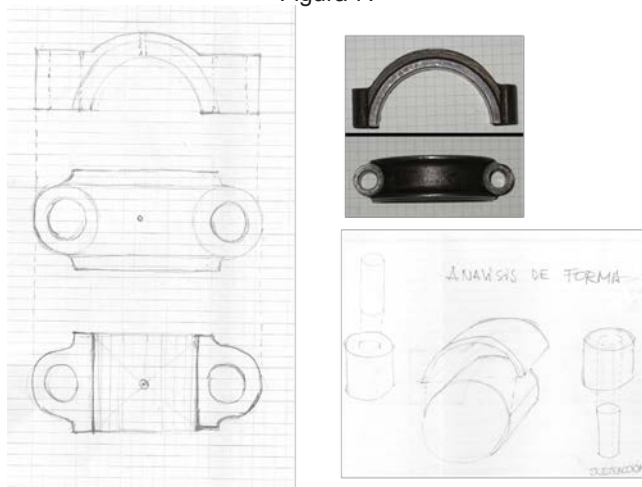


Figura 8

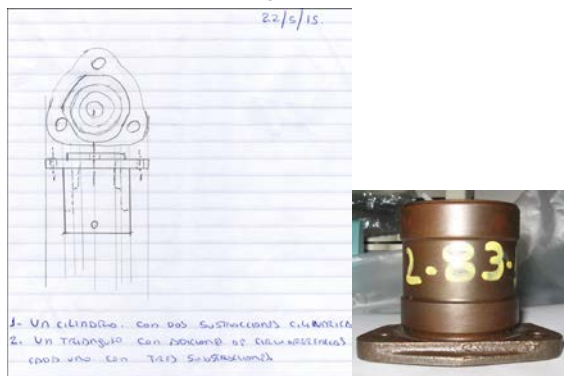


Figura 9



## CONCLUSIONES

El recorrido propuesto permitió:

- Contribuir a la revisión de las prácticas de enseñanza del dibujo tecnológico para la mejora de los resultados y experiencias de aprendizaje de los jóvenes que asisten a las escuelas técnicas.
- Propiciar espacios de intercambio y difusión en relación con el lugar y el sentido del dibujo tecnológico como instrumento lógico-formativo propio de las disciplinas tecnológicas.
- Promover el reconocimiento de los entornos virtuales como espacios potenciales de modelización de fenómenos tecnológicos.
- Favorecer la revisión de las prácticas de enseñanza-aprendizaje de los sistemas de representación atendiendo a los requerimientos que los nuevos entornos tecnológicos imponen al ejercicio de la profesión docente.
- Finalmente puede mencionarse, que los asistentes manifestaron la importancia de participar de instancias como la transcurrida, alentando de esta forma la actividad extensionista de la UIDET-GIGA.

## AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a los Ingenieros Lanciotti y Fabris por su colaboración en el dictado de los módulos sobre el dibujo tecnológico de escala civil, y simbología normalizada para cañerías y sus accesorios, respectivamente y, muy especialmente, a los docentes participantes del curso.

## REFERENCIAS

- [1] Varios (2009). *Anexo I de la Nueva Secundaria para la Provincia de Buenos Aires* El Ciclo Básico de la Educación Técnico Profesional en la Secundaria de la Provincia de Buenos Aires, correspondiente al Exp. N° 5801-4.863.914/09.
- [2] Varios (2009). *Anexo III Diseño Curricular de la Educación Secundaria Modalidad Técnico Profesional* en la Secundaria de la Provincia de Buenos Aires, correspondiente al Exp. N° 5801-4.863.914/09.
- [3] Defranco, G., Lopresti, L., Gavino, S., Fuertes, L., Lara, M., Ristevich, A. "Nuevas técnicas de relevamiento 3D aplicadas a la enseñanza del dibujo para ingeniería. Hacia un nuevo cambio de paradigma" En XI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica: resúmenes. - 1a ed. - La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 2013. 560 p.; 23x15 cm. ISBN 978-950-34-1026-4
- [4] Cardone, V. (2009), "La Representación Gráfica de Naturaleza Técnica", en Curso de Actualización de la Facultad de Ingeniería, UNLP, La Plata, mayo 2009.
- [5] Carabantes, P. y otros (2005) "Dibujo Industrial: Conjuntos y Despieces" (2ª Ed.). Ed. Paraninfo. Madrid.
- [6] Félez, J.; Martínez, M. (2008) "Ingeniería Gráfica y Diseño". Ed. Síntesis. Madrid.
- [7] Fuertes, L.; Lopresti, L.; Gavino, S.; Ristevich, A.; Defranco, G. (2007) "Actividad Experimental de Introducción del Dibujo Paramétrico en el Proceso de Diseño de un Objeto" II Congreso Internacional de Expresión Gráfica en Ingeniería y Arquitectura. Córdoba.

## **Variación microestructural por diferentes velocidades de enfriamiento en un tratamiento térmico de recocido de ablandamiento en aleación de uso aeroespacial**

Juan Lacoste, Ana Laura Cozzarín(\*), Daniel Tovio, Alfredo González

ProInTec I&D, Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, (UNLP), 1900, BA, Argentina

(\*) Email: [acozzarin@ing.unlp.edu.ar](mailto:acozzarin@ing.unlp.edu.ar)

### **Introducción**

En el campo de la industria aeroespacial resulta de vital importancia la relación resistencia-peso de los materiales utilizados. En las aleaciones de aluminio de alta resistencia la incorporación de Litio tiene la particularidad de reducir la densidad y presenta características de endurecimiento por precipitación deseables. Además, el módulo de elasticidad del aluminio puro se incrementa aproximadamente un 6% en cada adición de 1% en peso de Li.

En el grupo ProInTec I&D se trabajó en el desarrollo de la aleación AA2195, y con el objetivo de procesarla para obtener chapas del orden de los 2 mm de espesor se realizó un estudio de las condiciones en recocido total, basado en experiencias anteriores, sobre aleaciones de aluminio de la serie 2XXX. Si bien este tratamiento térmico suponía la obtención de un material más susceptible de ser deformado plásticamente, al efectuarlo se encontró que el mismo presenta una gran cantidad de fase interdendrítica y en el interior de los granos, una fase con forma de estructura acicular rica en litio ( $Al_2CuLi$ ), la cual no favorece la capacidad de deformación plástica de los materiales metálicos, ya que actúa como concentrador de tensiones. En función de esto se ha desarrollado un tratamiento térmico alternativo capaz de generar una condición microestructural que se adapte a las exigencias impuestas por el proceso de deformación en la fabricación de chapas.

### **Desarrollo experimental**

El desarrollo de tareas ha consistido en el procesado completo de la aleación AA2195, partiendo desde la fusión. Para ello, se utilizó un método de colada por surgencia, utilizando un único canal de alimentación ya que las características de la placa a obtener no requerían ataques adicionales, así mismo se implementó un montante de arena en la parte superior para disminuir la extracción calórica de la zona.

Con el fin de establecer la condición de partida desde el punto de vista microestructural de la placa, antes de comenzar con su procesado se generaron muestras metalográficas en la condición de "como colada" sin ataque químico con diferentes aumentos, previo al tratamiento térmico de homogeneizado.

Habiendo establecido la microestructura de partida se procedió a realizar un tratamiento de homogeneizado. Los parámetros correspondientes a este se han establecido a partir de experiencias llevadas a cabo en ProInTec I&D sobre aleaciones de la serie 2XXX, ya que al ser una aleación estratégica en el desarrollo aeroespacial no se encuentra material bibliográfico disponible que indique los valores de temperatura y tiempo para realizar el homogeneizado de la aleación. El proceso se realizó en un horno eléctrico de resistencias a una temperatura de 480 °C durante 22 horas.

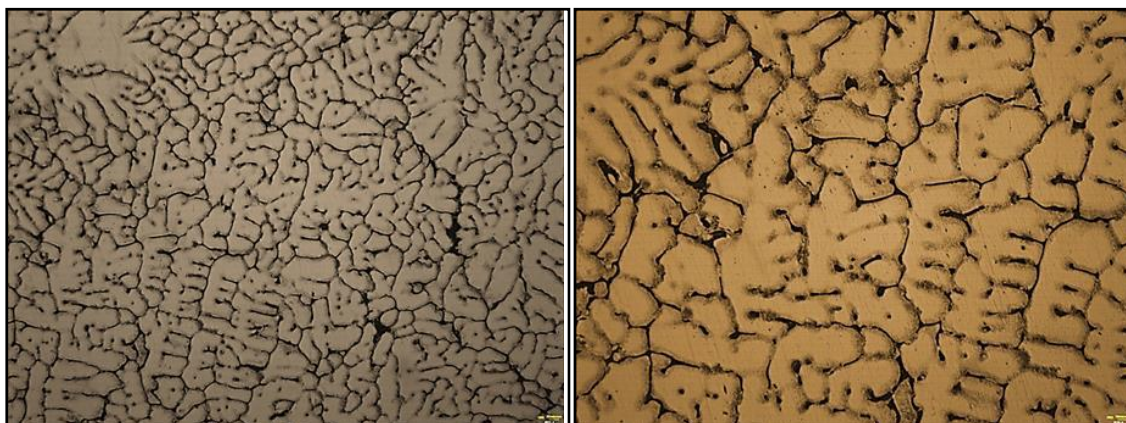


Figura 1: Aleación AA2195 en condición "como colada". Izquierda: 100x. Derecha: 200x.

A continuación, se presentan imágenes de las micrografías realizadas luego del homogeneizado. En ellas puede notarse un cambio sustancial de la microestructura, disolviendo parte de la fase que se encuentra en las zonas interdendríticas.

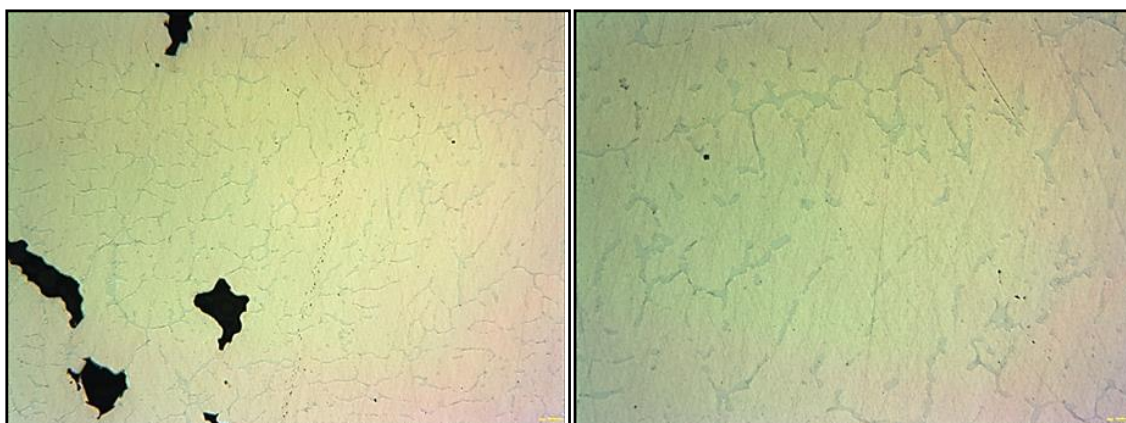


Figura 2: Aleación AA2195 en condición homogeneizada. Izquierda: 100x. Derecha: 200x.

Contando con el material en estado homogeneizado, también sobre el sustento de estudios previos en aleaciones de aluminio de alta resistencia, se decidió llevar a cabo un recocido de ablandamiento.

El tratamiento térmico de recocido de ablandamiento sirve para la precipitación amplia de constituyentes de la aleación que se encuentran disueltos, sobresaturados, en forma gruesa, o para la transformación de precipitados coherentes y/o parcialmente coherentes en fases incoherentes, estables. En las aleaciones de alta resistencia estudiadas anteriormente se realizaron recocidos de ablandamiento durante 2 – 3 horas a 415 °C con posterior enfriamiento a una velocidad inferior a 30 °C/h hasta los 290 °C y luego se dejaba enfriar en el horno a una velocidad superior a la anterior.

En este caso, para la aleación AA2195 se realizó a una temperatura de 420 °C durante 3 horas, con un enfriamiento a una velocidad menor a 30 °C/h hasta los 290 °C y luego se dejó enfriar en el horno hasta la temperatura ambiente, tardando para ello más de 12 horas.

Como puede notarse en la figura 3, las muestras presentan una gran cantidad de fase interdendrítica y en el interior de los granos una fase de geometría acicular.



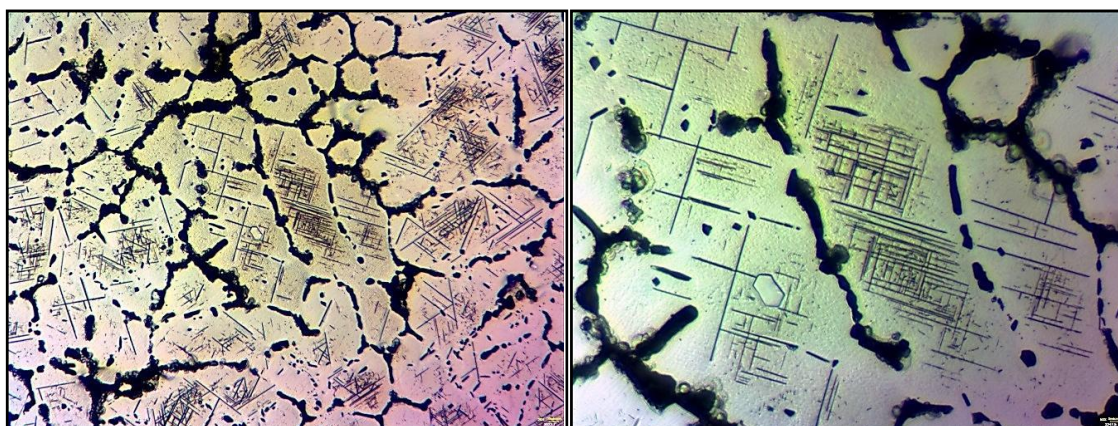


Figura 3: Aleación AA2195 con recocido de ablandamiento. Izquierda: 200x. Derecha: 500x.

Esta fase que se presenta en el interior de los granos, según bibliografía consultada, se trataría de  $Al_2CuLi$  (T1). Durante la solidificación aparece a partir de los  $475\text{ }^\circ\text{C}$  aproximadamente en los límites de grano y es ella la responsable del endurecimiento de la aleación en rangos bajos de temperatura ya que, luego de solubilizarse, precipita principalmente en temperaturas que van de  $140$  a  $260\text{ }^\circ\text{C}$  y con morfología en forma de placa. En estudios a temperaturas por debajo de los  $120\text{ }^\circ\text{C}$  no se aprecian signos de nucleación de la fase T1.

Una vez alcanzada esta condición, el material ha sido procesado por laminación a una temperatura de  $440\text{ }^\circ\text{C}$ , partiendo de un espesor aproximado de  $29\text{ mm}$  hasta alcanzar un espesor final de  $4\text{ mm}$ . Si bien no se analiza estrictamente en el presente trabajo la respuesta del mismo a la deformación plástica en caliente, se destaca el comportamiento y evolución microestructural del material, principalmente de la fase T1.

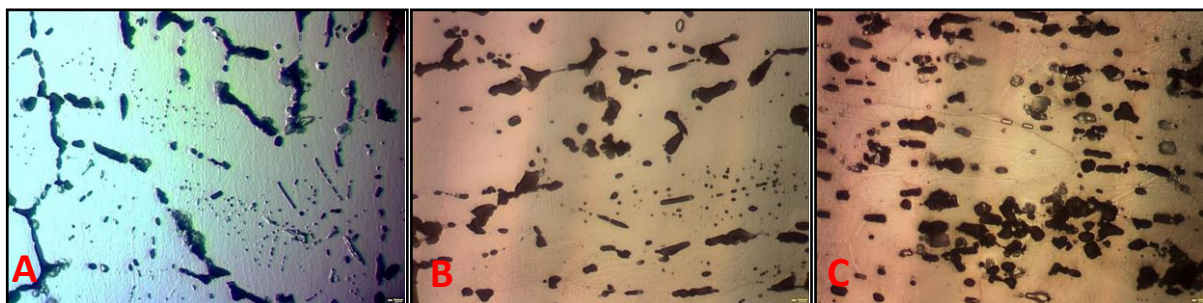


Figura 4: Aleación AA2195 con recocido de ablandamiento laminada en caliente a  $440\text{ }^\circ\text{C}$ . Porcentaje de deformación: (A) 44%; (B) 55%; (C) 86%. Aumentos: 200x.

Las imágenes anteriores muestran la evolución microestructural a medida que el porcentaje de deformación y el tiempo en horno aumentan. Nótese que a medida que el proceso avanza se aprecia un cambio considerable en términos de morfología y cantidad presente de la fase T1. Como se mencionó esta fase se desarrolla principalmente entre los  $140\text{ }^\circ\text{C}$  y  $260\text{ }^\circ\text{C}$ , por lo cual es de esperarse que a  $440\text{ }^\circ\text{C}$  la misma se disuelva.

Si comparamos la imagen A (44% de deformación) con la imagen B (55% de deformación) puede apreciarse una mayor orientación en la dirección de laminación. Al mismo tiempo con este fenómeno, resulta notable la disminución en la presencia de la fase T1.

Habiendo alcanzado el espesor final deseado de  $4\text{ mm}$  (Imagen C - 86% de deformación) se percibe una microestructura de segunda fase fuertemente orientada en la dirección de laminación. A esta situación se suma una notable disminución, como venía sucediendo, en la presencia de la fase T1, la cual se encuentra prácticamente ausente.

Si bien no es el objetivo de este trabajo, debe destacarse que en los estudios realizados sobre la aleación AA2195 se pretendía elevar al máximo su capacidad de asimilación de deformación plástica en caliente. En este sentido, la morfología de la fase T1 de estructura acicular resulta ser una complicación en términos de sanidad del material al momento de la obtención de chapas laminadas, fundamentalmente porque su morfología juega un rol perjudicial en la capacidad de asimilar deformación plástica por parte del material, principalmente por su carácter de concentrador de tensiones y por ende facilitador de problemas de inicio y propagación de fisuras.

Debido a esto, resulta estrictamente necesario evitar la presencia de esta fase rica en litio en forma de placas, motivo por el cual se ha planteado una sensible modificación en el tratamiento térmico de recocido de ablandamiento, consistente en una variación en el proceso de enfriamiento del material, más precisamente, un temple en agua al alcanzar los 290 °C.

La intencionalidad de este temple fue inhibir la formación de la fase T1 dentro de los granos, esperando que estos, resulten mas capaces de responder positivamente a la deformación plástica. Luego de mantener por 3 horas el material a 420 °C se comenzó un enfriamiento lento a menos de 30 °C/h hasta los 290 °C y posteriormente se templó en agua a temperatura ambiente.

### Resultados y discusión

Como ya se ha dicho, en conocimiento de las limitaciones en cuanto a la capacidad de asimilación de deformación plástica que presenta un material cuya microestructura cuenta con segundas fases de morfología acicular se ha planteado un tratamiento térmico alternativo al recocido de ablandamiento tradicional, buscando establecer una variación microestructural óptima para la obtención de chapas por laminación.

De esta manera, repitiendo los pasos del tratamiento térmico original y realizando un temple en agua a temperatura ambiente una vez alcanzados los 290 °C se obtuvo la siguiente microestructura.

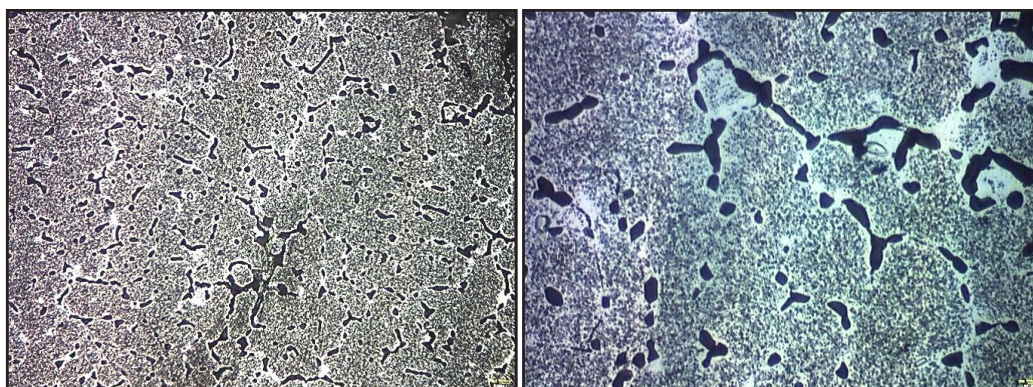


Figura 5: Microestructura resultante luego del recocido de ablandamiento modificado.  
Izquierda: 200x. Derecha: 500x.

Como puede observarse en las micrografías anteriores, se percibe una disminución de la cantidad de fase que se encuentra dispuesta de manera interdendrítica y a su vez la fase T1 no se encuentra en forma de placa en el interior de los granos, estas condiciones podrían ser beneficiosas para el proceso de deformación plástica por laminación.

Cabe destacar que la variación presente en el tratamiento térmico es el único cambio realizado. Luego de esto el material fue sometido a un nuevo proceso de deformación con parámetros de laminación análogos a los del primer caso. Para comparar fielmente el efecto



de la variación microestructural presente en el material se extrajeron muestras con similares porcentajes de deformación a las indicadas en la figura 4.

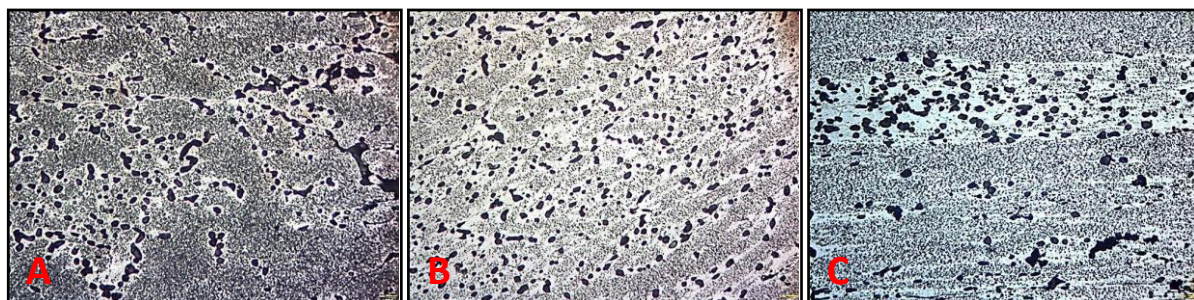


Figura 6: Aleación AA2195 con recocido de ablandamiento modificado laminada en caliente a 440°C. Porcentaje de deformación: (A) 44%; (B) 55%; (C) 86%.

En el primer caso (A), como era de esperarse, no existe aún, una clara orientación en la dirección de laminación, situación que se corresponde con el comportamiento expresado por el material con recocido de ablandamiento con enfriamiento lento, para un similar porcentaje de deformación. Aunque se percibe una mejor asimilación de la deformación por parte del material en vistas de una superficie sana sin grietas ni fisuras destacables.

Continuando con la deformación, la muestra (B) expone una orientación de la microestructura en la dirección de laminación. Por otro lado, en términos macroscópicos, la superficie del material presenta una mayor cantidad de grietas y fisuras, lo que es esperable, aunque se mantiene siempre en un grado de daño sustancialmente menor al del material con recocido de ablandamiento con enfriamiento lento para un comparable porcentaje de deformación. Por último, la muestra (C) expone una situación aún más pronunciada de los fenómenos indicados para las muestras (A) y (B), como puede apreciarse en la figura 6.

Una vez finalizado el proceso, puede destacarse la influencia que tenía la fase T1, según su morfología, sobre la respuesta del material a la deformación, ya que, si bien a nivel microestructural se percibe la esperable direccionalidad en función del trabajado, en términos de sanidad de la chapa obtenida, existe una gran diferencia para mejor, de la chapa procedente del tratamiento térmico de recocido de ablandamiento modificado respecto de la original con recocido de ablandamiento con enfriamiento lento.

Este resultado es tan claro que puede apreciarse a simple vista el efecto producido por la presencia o no, de la fase T1 ( $Al_2CuLi$ ) en la capacidad de asimilación de deformación plástica por parte del material, obteniéndose de esta manera chapas sustancialmente más sanas y de mejor terminación superficial con el tratamiento térmico alternativo propuesto.

En las imágenes siguientes se puede apreciar claramente la diferencia existente en cuanto a condición física resultante de las chapas luego de la deformación. Mientras que en la chapa con recocido de ablandamiento con enfriamiento lento (fase T1 con morfología de placas en el interior de los granos) se ve gran cantidad de escamaciones y fisuras sobre la cara de laminación, y un lateral irregular y agrietado, en la chapa deformada con recocido de ablandamiento modificado no se percibe la presencia de escamas y se dispone de una superficie mucho más sana, mientras que los laterales se encuentran con muy pocas irregularidades y agrietamiento.

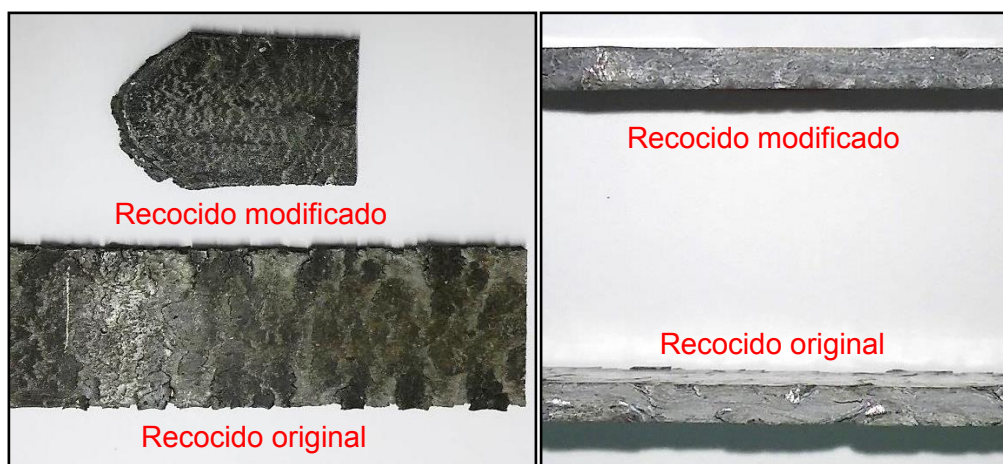


Figura 7: Efecto de la presencia de la fase T1 ( $Al_2CuLi$ ) con morfología acicular en la sanidad de chapas de aluminio AA2195 obtenidas por deformación plástica en caliente.

### Conclusiones

Como se ha expresado en el desarrollo del trabajo, en función de la microestructura resultante de un recocido de ablandamiento tradicional y la afección que esta genera en términos de sanidad y terminación superficial sobre el procesado de chapas de aluminio AA2195, se ha estudiado y establecido el diseño de un nuevo tratamiento térmico. Para mejorar la capacidad de deformación plástica del material se efectuó un recocido de ablandamiento similar a aquel que se utilizaba en las aleaciones de aluminio de alta resistencia estudiadas previamente ya que al analizar la microestructura resultante se encontró una fase en el interior de los granos en forma acicular.

Luego de las investigaciones y los estudios experimentales realizados se puede inferir que esta fase que se encuentra allí presente se trataría de  $Al_2CuLi$  (T1) y luego de solubilizar la aleación, la fase precipitaría principalmente entre los 140 y los 260 °C.

Si se lamina la aleación con recocido de ablandamiento tradicional a 440 °C, la fase T1 a medida que transcurre el tiempo se disuelve, por lo que a esa temperatura la aleación en equilibrio presenta la fase de forma acicular en el interior del grano.

Cuando se realizó una variante al recocido de ablandamiento tradicional (mantener a 420 °C, enfriar a una velocidad inferior a 30 °C/h hasta 290 °C y luego templar en agua) no se encontró la fase en el interior del grano en forma acicular.

El hecho de generar condiciones microestructurales diferentes en el material, a partir de distintos recocidos de ablandamiento, ha permitido evaluar netamente la influencia de la fase T1 según su morfología.

Al laminar en caliente el material en diferentes condiciones, se ha percibido que su respuesta y capacidad de asimilar la deformación resulta muy diferente. Esto se manifiesta principalmente, en el estado físico de las chapas laminadas, donde para valores comparables de deformación acumulada, el material con recocido de ablandamiento y enfriamiento rápido presenta un estado de sanidad superior al que no cuenta con esta variante en el recocido.

De esta manera, resulta claro que la morfología de esta fase (T1) en la microestructura tiene una influencia directa en la capacidad del material de asimilar la deformación plástica, obteniéndose resultados de calidad superior, cuando se evita su presencia en forma de placas en el interior de los granos del material.

### **Bibliografía**

- [1] A.Hekmat-Ardakam, E.M. Elgallad. Microstructural evolution and mechanical properties of as – cast and T6-treated AA2195 DC cast alloy. (2012)
- [2] Time-Temperature – Precipitation Behavior in Al-Li Alloy 2195. Nasa/TM-2002-211548
- [3] J.S. Ekvall, J.E. Rhodes. G.G. Wald, ASTM STP 761 (1982) 328.
- [4] Y.X.Du,X.M.Zhang,L.Y.YE,S.D.Liu,Trans.NonferrousMet.Soc.China16 (2006) 321–326.
- [5] R.Crooks,Z.Wang,V.I.Levit,R.N.Shenoy,Mater.Sci.Eng.A257(1998) 145–152.
- [6] C.P.Blankenship,L.R.Kaisand,Scr.Mater.34(1996)1455–1460.
- [7] K.Surekha,B.S.Murty,K.PrasadRao,Surf.Coat.Technol.202(2008) 4057–4068.

## METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL DESVANECIMIENTO DEL REFINADOR DE GRANO EN ALEACIONES BIFÁSICAS

Cicchetti Juan P., Musmeci Maximiliano, González Alfredo C., Maffía Ernesto G.

ProInTec I&D, Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, (UNLP), 1900, BA, Argentina  
[cicchetti.ing@gmail.com](mailto:cicchetti.ing@gmail.com)

### INTRODUCCIÓN

Las aleaciones de latón: Cu-40Zn son ampliamente utilizadas comercialmente para fabricar válvulas para fluidos que operan a bajas presiones porque presentan una gran resistencia a la corrosión, son de bajo costo de fabricación y fácilmente mecanizables. Estos materiales están presentes también en la vida hogareña en artículos de grifería por su agradable apariencia. Dentro de la familia de los latones comerciales, la aleación más usada en nuestro país es el denominado latón amarillo con plomo (C85700), número que indica que pertenece al grupo de las aleaciones coladas, de composición media: 63Cu-1Sn-1Pb-35Zn

Uno de los inconvenientes que presenta el proceso de fabricación de griferías y válvulas con esta aleación es la fisuración en caliente. Este defecto (también llamado Hot Cracking) ocurre generalmente en piezas largas y huecas, de paredes finas, al comienzo de la solidificación en moldes metálicos de alta extracción calórica, con noyo cerámico interno; la diferencia de conductividad térmica de los materiales conformantes del molde induce una importante diferencia en la velocidad de solidificación en las paredes de la pieza, creando así las condiciones propicias para la rotura en caliente. Podría concluirse entonces que las grietas en caliente ocurren cuando conviven regiones líquidas y sólidas junto a la contracción generada por el enfriamiento diferencial: las tensiones internas producidas por la solidificación diferencial no pueden ser soportadas por el material y se inicia la fisura en aquellas regiones que aun contienen líquido. Estas zonas líquidas se las encuentran en los límites de grano donde además se segregan las impurezas de bajo punto de fusión, que ayudan a la formación de líquido.

Actualmente, se conoce que la reducción en el tamaño del grano del material ayuda a minimizar la segregación porque ésta reduce el tiempo de contacto entre regiones líquidas y sólidas durante la solidificación y se redistribuye el último líquido en un área granular mayor. Por lo que, el aumento del área intergranular por multiplicación de granos minimiza la posibilidad de la grietas en caliente.

Así, surge la necesidad de utilizar los llamados “refinadores de grano” en la fabricación de piezas especiales, pues estos aditivos mejoran la colabilidad y reducen o usualmente eliminan defectos de colada causados por contracción lineal y las grietas en caliente. La composición química de los refinadores para latones siempre incluye al hierro y al boro. Al momento de la colada, mientras disminuye la temperatura del líquido en el molde, el Boro actúa reduciendo la solubilidad del Fe, haciendo que éste último precipite antes del comienzo de la formación de la fase Beta del latón. Se beneficia entonces la nucleación heterogénea de los granos de la fase Beta, resultando en una mayor cantidad de granos nucleados. A medida que se desarrolla el enfriamiento, comienzan las reacciones en estado

sólido precipitando la fase alfa, cuya cantidad y morfología dependerá de la velocidad de enfriamiento y composición química utilizada. Otra de las ventajas del uso del refinador de grano, es una mejor distribución de los elementos aleantes que pueda llegar a tener el latón, gracias a la mayor cantidad de límites de grano, donde se repartirán más uniformemente. Un ejemplo de esto es el caso del plomo, el cual se adiciona para aumentar la maquinabilidad del producto colado en su posterior acabado final.

Probablemente el refinador actúa en el líquido disminuyendo su tensión superficial, y por tanto logra que el líquido “moje” mejor el molde al bajar su viscosidad. Es un parámetro importante a considerar durante la fusión el tiempo de vida del refinador pues todas las ventajas mencionadas no estarán presentes si el refinador no se encuentra activo o en las cantidades requeridas.

Es por todo esto que la vida de las partículas refinantes debe ser valorada por algún tipo de ensayo; si bien es fácil en aleaciones que solidifican como soluciones sólidas monofásicas o con pequeñas segundas fases, es realmente difícil en latones bifásicos debido a que la mezcla de fases enmascara el grano refinado. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo experimental es desarrollar un método para evaluar el tiempo de vida de un refinador de grano en un latón amarillo al plomo.

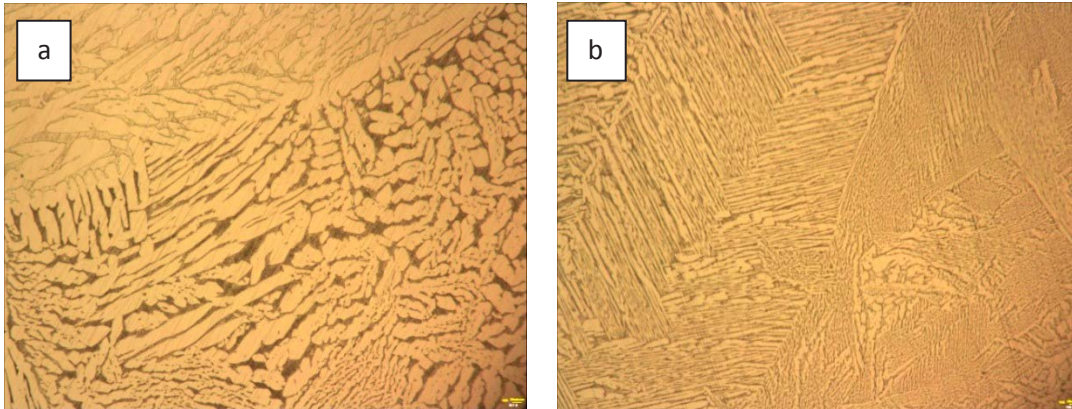
## **PARTE EXPERIMENTAL**

Los materiales utilizados fueron latón amarillo Cu-40Zn sin refinador y latón amarillo aleado con pequeñas cantidades de Pb, Al y Fe, los cuales resultan en un Zn equivalente cercano al 40%, con refinadores de distinto origen. Las aleaciones mencionadas fueron re-fundidas y mantenidas a 950 +/- 10°C. La temperatura fue controlada periódicamente a lo largo de todos los ensayos por medio de una termocupla tipo K. Para la fusión se utilizó un horno de crisol de carburo de silicio calefaccionado a gas natural. Las técnicas utilizadas para caracterizar las muestras fueron microscopía óptica (microscopio óptico marca Micoba) y técnicas de preparación metalográficas convencionales. El reactivo usado, para revelar la microestructura, fue FeCl<sub>3</sub> 10 ml, HCl 5 ml y H<sub>2</sub>O 100 ml. Se realizaron medidas de tamaño de grano basadas en la norma ASTM E112 - 10. Las muestras fueron luego analizadas por medio de una pistola portátil de fluorescencia de rayos X (marca Bruker S1 - Titán), a fin de determinar su composición química.

## **RESULTADOS**

En primer lugar, se funde un lingote de latón amarillo Cu-40%Zn sin refinador de grano y sin aleantes con distintas velocidades de enfriamiento para observar los cambios en una microestructura sin refinar. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes micrografías:

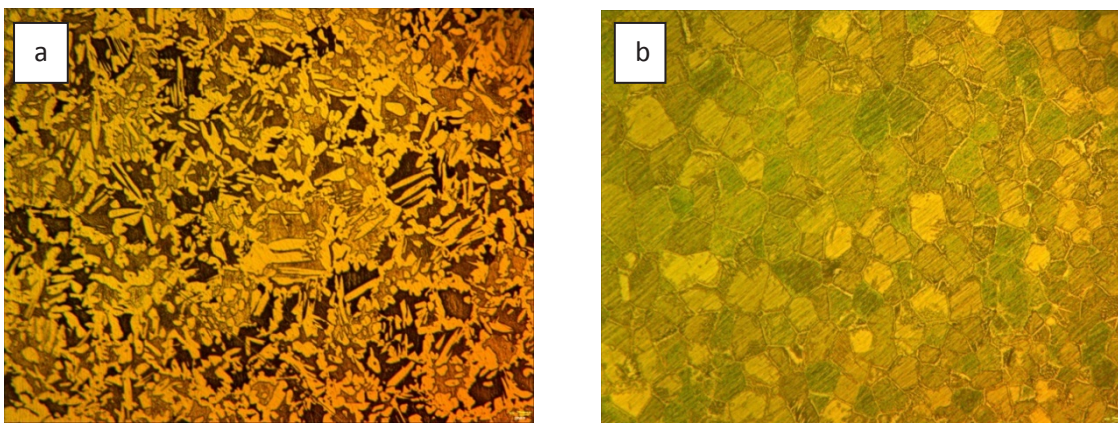




**Fig. 1 - (a) enfiada en molde de arena. (b) en molde metálico. 100x aumentos**

En las micrografías se observa una matriz de granos Beta (color marrón oscuro), sobre la cual se han desarrollado una serie de agujas de fase Alfa (color marrón claro). Todas comenzaron a crecer a partir de los límites de grano de la fase Beta. Sin embargo, la morfología de las agujas fue cambiando al aumentar la velocidad de extracción calórica; mientras que en el primer caso, una velocidad de enfriamiento lenta permite que las agujas de la fase alfa sean gruesas (Fig. 1 (a)) por otro lado el aumento de la velocidad de enfriamiento modificó la morfología de las agujas volviéndolas más finas (Fig. 1 (b)).

Se realizó exactamente el mismo procedimiento anterior pero con la aleación con refinador. Las metalografías obtenidas son mostradas a continuación;



**Fig. 2 – (a) Latón 60-40Zn con refinador de grano enfiado lentamente en molde de arena. (b) con refinador de grano templado en agua. 100x aumentos**

Se observa el cambio en la morfología de la fase alfa, cuando se compara estas micrografías con las expuestas en la Fig. 1. En el caso del molde en arena (Fig. 2 (a)), la fase alfa nuclea en los bordes de grano de la fase Beta, formando un conjunto de fases difícil de caracterizar por lo intrincado de la disposición. En cambio, en el molde templado en agua, las agujas de alfa fueron apenas visibles, muy finas y en escasa cantidad, observándose más claramente los límites de grano (Fig. 2 (b)).

Del análisis de las imágenes surge la idea que el mejor método para determinar la presencia del refinador en la estructura, es retener la estructura de colada en los instantes iniciales al comienzo de la solidificación. Esto se logra con un temple entre la temperatura de solidus y

el límite alfa/beta. Como resultado se obtiene una estructura granular y el análisis de esta morfología permite dilucidar el efecto del refinador de grano.

Como información adicional, es interesante resaltar que el enfriamiento en coquilla también representa una alternativa posible para lograr una rápida solidificación del metal. Tiene como única dificultad el hecho de necesitar un secado a más de 100°C para quitarle la humedad que pudo haber absorbido el óxido de hierro que se forma en su superficie ya que éste es higroscópico.

### ***Evaluación del fading***

A partir de los resultados obtenidos, se evalúan los parámetros siguientes:

#### Nivel de refinamiento

Cuanto menor sea el tamaño de grano alcanzado en el latón, mayores serán los beneficios en el producto final. Por lo tanto, el tamaño de grano logrado en la colada es un parámetro muy importante a considerar.

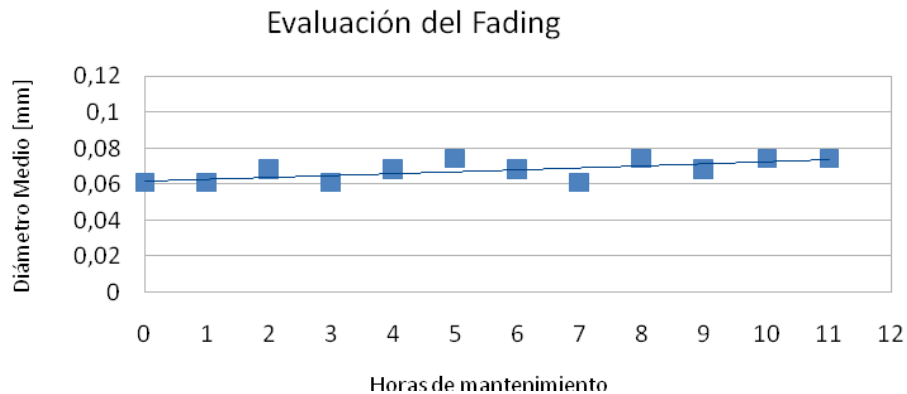
#### Tiempo de vida del refinador (Fading)

Otro parámetro a considerar es el tiempo en que el refinador permanece de manera activa en el metal líquido sin perder su capacidad de refinar la estructura. Puede suceder que pasado cierto tiempo el efecto del refinador sea anulado, generalmente producto de la oxidación o la combinación con otros elementos. Este hecho, conocido también por su nombre en inglés, "fading", es importante para saber si un metal líquido mantenido por largo tiempo a alta temperatura puede ser luego colado sin riesgo a perder el efecto del refinador. Por lo tanto, el tiempo en que el refinador permanece activo y logra un tamaño de grano pequeño también es otro parámetro importante a evaluar.

Teniendo esto como referencia, se procede a templar en agua las muestras coladas en el molde de arena; de esta manera se asegura el rápido enfriamiento para delinear correctamente cada borde de grano. Cada molde es desechado al templarlo, por ser de material descartable, por lo que se debieron fabricar suficientes moldes para tomar la totalidad de las muestras.

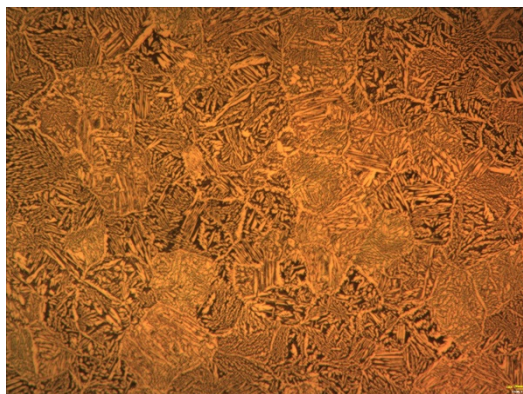
### ***Evaluación***

El ensayo de evaluación del fading fue realizado sobre la base de lingote de latón amarillo con un refinador de grano que contiene sales de boro. Inicialmente, se re-funde dicho lingote, se extrae una muestra de metal líquido, se la cuela en un molde de arena y se temple el conjunto. Esto último se repite cada una (1) hora hasta llegar al tiempo de 12 horas, correspondiendo por tanto un total de 13 muestras. Durante todo el ensayo se regula la llama del horno para mantener la temperatura en un rango de 950 +/- 10°C. De esta manera se obtienen los datos para poder evaluar tamaño de grano vs. tiempo de mantenimiento en estado fundido. Ver Gráfico 1.



**Gráfico 1.** Diámetro medio del grano en función de las horas de mantenimiento del líquido a  $950 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$

Se observa del gráfico que la potencialidad del refinador se mantiene activa durante las 12 horas del ensayo, no percibiéndose la presencia de fading. Esto es así ya que la pendiente de la línea de tendencia tiende a cero en el gráfico, manteniéndose los valores de tamaño de grano relativamente constantes en el tiempo.



**Fig. 3**—Estructura de latón después de estar 12 horas en estado líquido a  $950^\circ\text{C}$

En la Fig. 3 se presenta la microestructura templada de la última muestra después de mantenerla líquida, sin agitación y sin flux de cobertura por 12 horas. Observando la metalografía se percibe una creciente cantidad de fase alfa, que se proyecta desde los límites hacia el interior del grano, pero así y todo, se puede ver el borde de grano claramente.

La velocidad de enfriamiento fue siempre constante durante todo el test, entonces la variable extra a considerar fue la composición química. Debido a las 12 horas de mantenimiento, la aleación fue progresivamente perdiendo Zn por volatilización del mismo. Dicha pérdida no fue contrarrestada por el agregado de más Zn por considerarse intrascendente en este estudio, ya que la aleación se conservó siempre dentro del rango bifásico, industrialmente útil. Por lo tanto, al perder Zn, referenciándose al diagrama de equilibrio se tendrán crecientes cantidades de fase alfa evaluadas por la regla de la palanca. A pesar de utilizar alta velocidad de enfriamiento, dichas cantidades de alfa no pudieron ser suprimidas de la estructura, apareciendo por tanto en las figuras de las últimas 3 horas del ensayo, ver Fig. 3. La pérdida de Zn, al hacer crecer la cantidad de alfa coexistente en equilibrio con la fase

beta, dificultó levemente la medición del tamaño de grano en las últimas 3 horas del ensayo para cada refinador. Sin embargo dicha pérdida no afectó de manera significativa a los resultados obtenidos.

Por otro lado, también fue evaluada la variación de los distintos elementos de la composición química del latón en función del tiempo de mantenimiento del metal líquido. El contenido de Zn disminuyó aproximadamente un 2% respecto del total de los componentes de la aleación. Los demás aleantes, Pb, Al y Fe, no sufrieron pérdida alguna en el transcurso de los ensayos. En las últimas horas, su porcentaje relativo se vio ligeramente incrementado, producto de la disminución del porcentaje relativo de Zn en la aleación. Es importante notar que el Fe, principal causante del refinamiento del latón, se mantuvo constante, con valores adecuados para refinar, lo cual se condice con lo observado en los ensayos donde el fading estuvo ausente.

## CONCLUSIONES

En definitiva, el método encontrado consta de los siguientes pasos:

- 1) Fabricación de un molde de arena, tipo cilindro hueco de 3 cm de diámetro por 10 cm de alto;
- 2) Colado del metal líquido en el molde de arena;
- 3) Sumersión y agitación del molde en agua, una vez que el líquido haya solidificado (60 segundos después de colado);
- 4) Corte y preparación metalográfica de la muestra;
- 5) Evaluación del tamaño de grano a partir de microscopía óptica;

El método desarrollado permite una rápida y fácil obtención de resultados para evaluar la presencia del refinador de grano en la aleación. El método puede ser reducido al límite de requerir una mínima interpretación y conocimiento por parte del evaluador de la metalografía, dando mayor amplitud de aplicación al método.

## Bibliografía:

- *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys. Various authors. 1991*
- *ASM Handbook Volume 4: Heat Treating. Various authors. 1991*
- *Grain refinement of permanent mold cast Copper base alloys. M. Sadayappan, J.P. Thomson, M. Elboujdaini, G. Ping Gu, and M. Sahoo. 2004*



## CARACTERIZACIÓN DE DEFECTOS POR SEM DE UNA SOLDADURA POR FRICCIÓN Y AGITACIÓN (FSW) EN CHAPAS DE ALEACIÓN DE ALUMINIO.

L. E. Feloy, D. A. Vucetich(\*), A. C. Gonzalez

Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata,  
(UNLP), 1900, BA, Argentina

(\*) Facultad de Ingeniería de La Plata (UNLP), BA, Argentina

(\*). Email: danilo.vucetich@ing.unlp.edu.ar

### RESUMEN

La soldadura por fricción y agitación es un proceso de unión de materiales en fase sólida. Una herramienta cilíndrica con un movimiento de rotación se introduce en la línea de soldadura por medio de una fuerza axial, el roce producido por la herramienta con el material base produce un aumento en la temperatura suficiente para llevar el material a un estado plástico en el cual es capaz de fluir y así lograr la unión.

Durante los últimos años el grupo de trabajo que desarrolla este proceso en la Facultad de Ingeniería, ha logrado obtener soldaduras sanas en chapas de aluminio de alta resistencia, dentro de los parámetros de las normas correspondientes. Pero al someter a las uniones a ensayos de tracción, se ha podido observar un comportamiento errático en los resultados. Este fenómeno motivó al análisis de las muestras mediante microscopía electrónica para intentar explicarlo, desde la microestructura de la soldadura.

Los resultados obtenidos muestran la nucleación de micro defectos en las uniones de diferentes morfologías. Las dos preponderantes son la aparición de agrupaciones de poros ordenados en las superficies de deformación experimentadas por el material y un segundo tipo de defecto que aparenta ser una ruptura a través del borde de grano del material.

Lo encontrado mediante este análisis permitió plantear una serie de hipótesis al respecto de la generación de estas discontinuidades. Entre estas, surgió la relación que todo este conjunto de fenómenos puede tener con la temperatura equicohesiva del material. Si esta hipótesis se corrobora, se podría explicar de buena manera, el comportamiento mecánico de la unión en función a las variables de entrada del proceso.

### INTRODUCCIÓN.

Desde hace un tiempo, el grupo de trabajo en Friction Stir Welding de la Facultad de Ingeniería, perteneciente al grupo ProInTec I&D, centró sus esfuerzos en conocer el proceso de soldadura por fricción-agitación. Desde entonces, se trabajó sobre la soldadura a tope de distintas aleaciones de aluminio, con el objetivo de generar el conocimiento suficiente que permita la realización de soldaduras sanas en aleaciones de aluminio de alta resistencia.

Para esto, se desarrollaron herramientas, se realizaron decenas de metros de soldadura y se ensayaron las muestras mediante métodos destructivos y no destructivos. Los resultados de estos ensayos permitieron avanzar en el conocimiento y, por lo tanto, avanzar sobre las aleaciones deseadas.



Durante las experiencias realizadas, se adquirió la norma ISO 25239 con la que se comenzó a estandarizar la realización de muestras para caracterizarlas y, de manera interna, certificarlas. Así fue que se creó, además de lo previsto por la norma para la realización de las muestras, un protocolo de medición de temperatura del proceso, un protocolo de inspección visual para una primera aceptación, un protocolo de inspección con tintas penetrantes de alta definición, un protocolo de ensayo mediante rayos x, un protocolo de ensayos mecánicos mediante el ensayo de tracción y un protocolo de análisis micrográfico mediante ataque químico y microscopio óptico.

Bajo estas condiciones se realizaron decenas de muestras de soldaduras variando los parámetros de velocidad de avance y velocidad de giro persiguiendo el objetivo de obtener una soldadura lo más eficiente posible. Los resultados de los ensayos de tracción fueron analizados desde distintos puntos de vista para tratar de encontrar patrones que indicaran un camino certero hacia la selección de parámetros de proceso que conlleven una soldadura de alta eficiencia.

En el proceso, se encontró una condición de los resultados que, si bien no parecía ser la herramienta para destrabar el camino hacia el objetivo general, podía encausar su resolución. Ordenando los valores de resistencia máxima a la tracción en función de la velocidad de giro de la herramienta y la velocidad de avance, se pudo observar que presentan dos comportamientos bien diferenciados. A partir de un cierto valor de velocidad de giro, los resultados del ensayo se vuelven aleatorios, alternando valores altos y bajos sin razón aparente. Por debajo de este valor, los resultados se vuelven previsibles ordenándose en función a los parámetros mencionados.

En trabajos anteriores, se estudiaron en profundidad los datos obtenidos y se desarrolló una hipótesis que puede explicar el cambio en el comportamiento de las uniones sometidas a ensayos de tracción. La hipótesis resultante es que en un cierto rango de velocidades de giro de la herramienta, se supera la temperatura equicohesiva del material y cambia el mecanismo de deformación plástica. A partir del punto en el que comienza el deslizamiento por borde de grano, comienzan a multiplicarse las probabilidades de nuclear defectos en estas regiones.

El objetivo de este trabajo es analizar mediante la técnica de microscopía electrónica la posibilidad de existencia de defectos y su morfología en los cordones de soldadura teóricamente sanos.

## **DESARROLLO EXPERIMENTAL.**

Como fue mencionado durante la introducción, decenas de muestras fueron realizadas según lo especificado en la norma ISO 25239 en sus capítulos 2 y 5. Se realizaron en chapas planas de dimensiones especificadas en la norma mencionada. La máquina utilizada para tal fin, fue una fresa de 3 ejes controlada por un CNC Siemens.

La herramienta utilizada para realizar las uniones es un desarrollo propio que consta de un cuerpo fabricado en acero y un pin obtenido de una herramienta para roscar. La figura 1 muestra una imagen de la herramienta antes de ser utilizada.

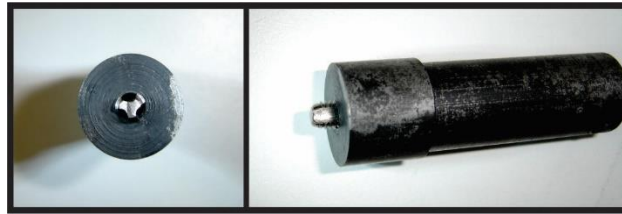


Figura 1: herramienta desarrollada para el proceso.

Para lograr el efecto del ángulo de inclinación de la herramienta, debido a la imposibilidad de girar el usillo de la máquina, se mecanizó un bloque de acero que actuaría como respaldo con 3° de inclinación y de esta manera inclinar las chapas a ser soldadas.



Figura 2: Chapas dispuestas en respaldo para ser soldadas.

Antes de realizar las muestras, se preparaban las chapas para la medición de temperatura del proceso. Para esto, se realizaron perforaciones en las que se introdujeron termocuplas tipo K de 0,5 mm de diámetro, para asegurarse una respuesta rápida frente a los cambios de temperatura. El esquema de la posición de las termocuplas se muestra en la figura 3. Aunque se sabe que el método no es capaz de dar la temperatura exacta del proceso, debido a que la termocupla interfiere en el flujo y por lo tanto en la temperatura puntual, se entiende que es el método que puede brindar más aproximadamente la temperatura de la región.

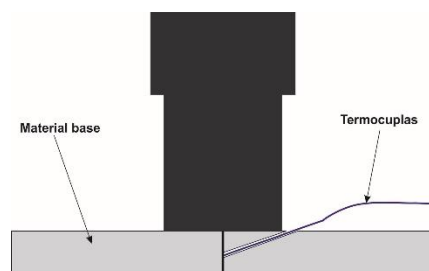


Figura 3: Esquema de introducción de termocupla para la medición de temperatura.

Una vez terminadas las muestras, se verificaba su sanidad según los procedimientos mencionados en la introducción del presente trabajo. El orden en el cual se practicaban es:

- Inspección Visual.
- Ensayo de tintas penetrantes.
- Ensayo mediante rayos X

Certificada su condición de sanidad, se procedía a la obtención mediante mecanizado de las probetas de tracción. La región de la muestra destinada a tal fin y las dimensiones de la probeta, se encuentran definidas por la norma mencionada en el presente trabajo. El ensayo de las probetas se realizó con extensómetro hasta la rotura obteniendo como dato de análisis la resistencia máxima a la tracción, tal como dice la norma.

Paralelamente a los ensayos de tracción se realizaron análisis micrográficos de la sección transversal del cordón de soldadura. Las muestras para este estudio fueron obtenidas de la región determinada por la norma mencionada, pulidas y atacadas químicamente mediante un protocolo desarrollado bajo la misma norma. Estas muestras fueron observadas en un microscopio electrónico.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES.

En la referencia [7], se presentaron y analizaron los resultados de los ensayos mecánicos de las soldaduras realizadas. En la figura 4, se muestra, en particular, los resultados de los ensayos de tracción en función a la velocidad de giro y velocidad de avance de la herramienta con el objetivo de crear el contexto del análisis microestructural.

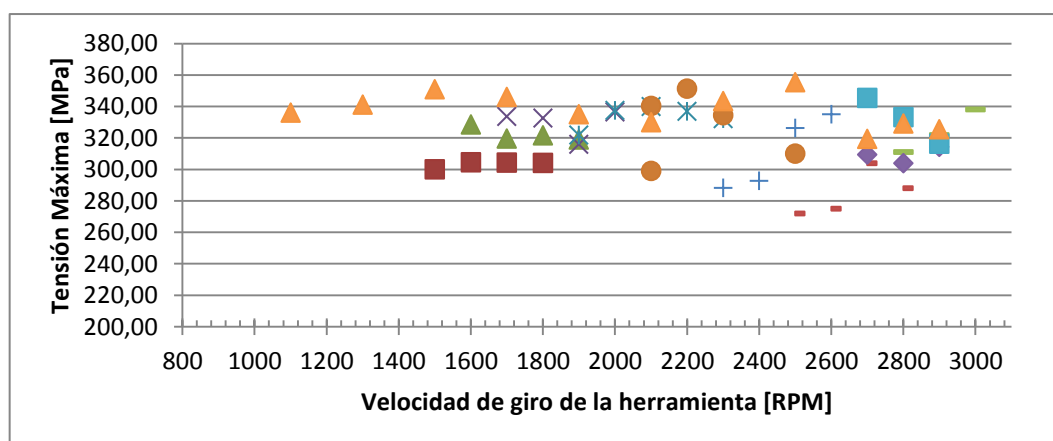
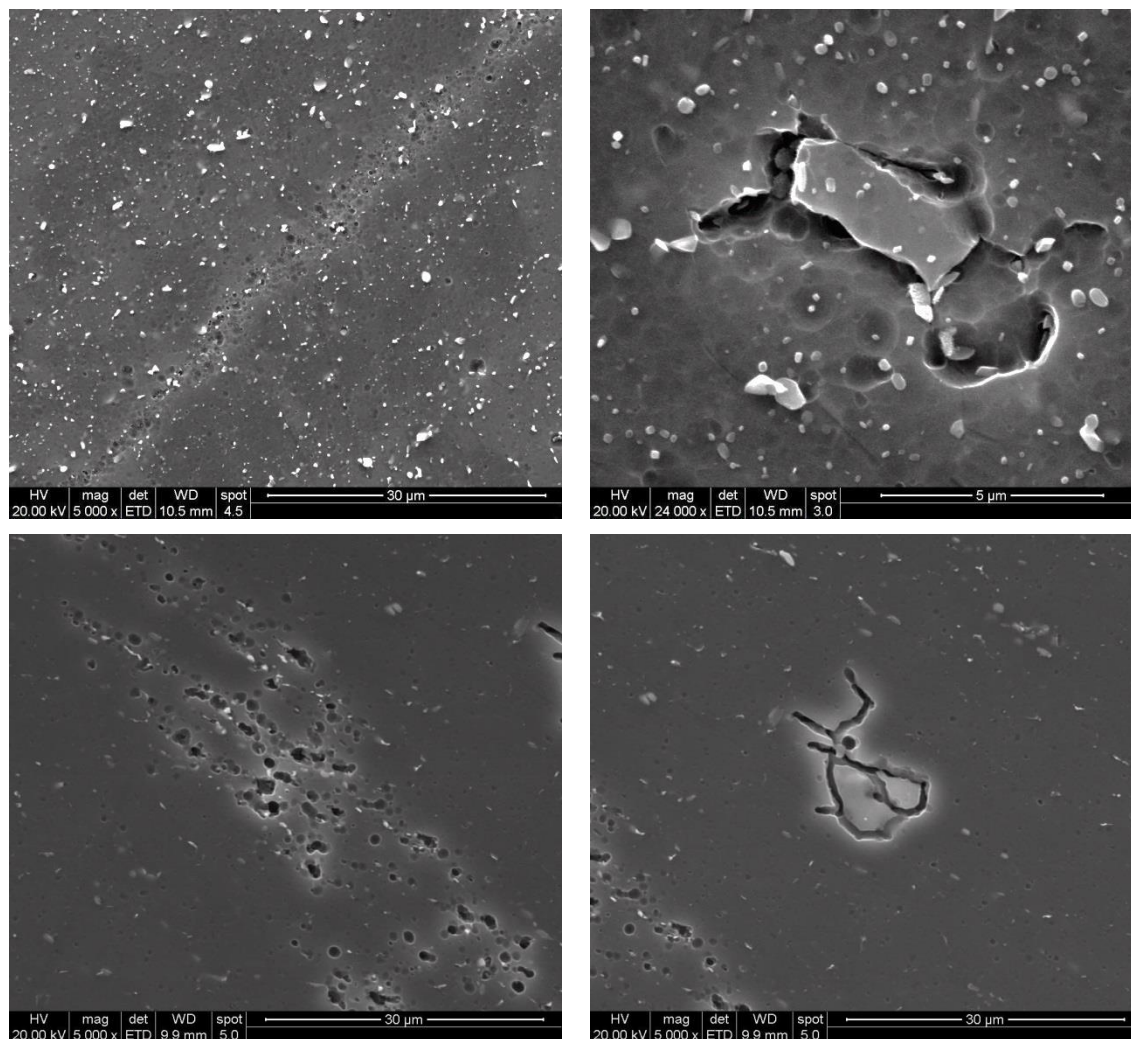


Figura 4: Gráfico de Resistencia máxima a la tracción vs velocidad de giro. Los valores de referencia son de velocidad de avance en mm/min.

Para poder comprender la aleatoriedad en el comportamiento mecánico de las soldaduras obtenidas con velocidades de giro de la herramienta superiores a 1900 RPM, se seleccionaron muestras para tratarlas y observarlas en el microscopio electrónico. El objetivo perseguido era buscar indicios de deformación plástica del material por el mecanismo de deslizamiento por borde de grano. Estas muestras habían sido ya analizadas a través del microscopio óptico y todas ellas habían sido declaradas libres de defectos.

En la figura 5 se muestra una selección de imágenes de las distintas muestras donde se pueden observar los defectos encontrados.



*Figura 5: Selección de imágenes de defectos encontrados en las muestras analizadas.*

Como se puede observar en las imágenes, las muestras no estaban libres de defectos como se había determinado con el análisis del microscopio óptico.

En particular, se encontraron dos tipos de defectos. En las imágenes encolumnadas a la izquierda de la figura 5, se puede observar un tipo de defecto en forma de poros agrupados. Esta agrupación no parece ser aleatoria. Los poros se encuentran distribuidos según las superficies de deformación plástica que el material sufrió durante las soldaduras. Estas regiones porosas se encontraron en menor o mayor medida en todas las muestras que se analizaron bajo el microscopio electrónico.

El otro tipo de defecto encontrado en las muestras es el que se puede observar en la columna derecha de la figura 5. Claramente la morfología de este defecto no se puede catalogar como poros y su agrupación tampoco está en concordancia con lo observado en el defecto anterior. Lo que se observa en este tipo de defecto es una fractura entre planos del material siguiendo una forma determinada. Si se compara esta geometría con la estructura de granos que se puede observar en las micrografías de las soldaduras, es posible decir que esas fracturas que explicaron anteriormente, podrían ser colapsos del borde de grano debido al exceso de deformación plástica.

## CONCLUSIONES.

Una conclusión es cierta, la aleatoriedad en el comportamiento mecánico de las muestras se encuentra ampliamente justificada por el contenido de defectos microscópicos en el cordón de soldadura.

Por otro lado, uno de los objetivos de este trabajo se centró en intentar corroborar, o acercarse a la validación, de la hipótesis de que el comportamiento mecánico de los cordones de soldadura realizados por Friction Stir Welding en chapas de aluminio de alta resistencia, se encontraba influenciado por el mecanismo de deformación plástica que había sufrido el material en función a la temperatura equicohesiva. Traducido esto a las experiencias realizadas, se podría decir que todas las muestras soldadas a velocidades inferiores a 1900 RPM se encontraron por debajo de la temperatura equicohesiva, mientras que las muestras que se realizaron por encima de la velocidad mencionada sufrieron temperaturas superiores y, por lo tanto, se generaron defectos que comprometen al comportamiento mecánico.

Parte del análisis descripto se encuentra en concordancia con la hipótesis. Si se da por cierta la especulación de que el segundo defecto descripto en el trabajo es por cierto un colapso en el borde de grano, entonces la hipótesis planteada en esta investigación se encuentra cerca de ser verificada. Para lograrlo totalmente faltarían algunos ensayos mecánicos sobre el material.

Queda pendiente la explicación del origen de la aglomeración de poros observada. Una posible explicación de este fenómeno, se podría basar en la condición de que, al estar deformándose el material a alta velocidad y mediante el mecanismo de deslizamiento por borde de grano, se podría generar un flujo turbulento que propiciara la nucleación de poros. Por supuesto que esta hipótesis deberá ser corroborada.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **Tang, W., y otros, y otros.** Heat Input and Temperature Distribution in Friction Stir Welding. *Process. Manuf. Sci.* 1999, págs. 163 - 171.
2. **International Standard Organization.** ISO 25239-2. *Friction Stir Welding - Aluminium - Part 2: Design of weld joints.* 2011.
3. **International Standard Organisation.** ISO 25239-5. *Friction Stir Welding - Aluminium - Part 5: Quality and inspection requirements.* 2011.
4. **Mishra, Rajiv y Mahoney, Murray.** *Friction Stir Welding and Processing.* s.l. : ASM International, 2007.
5. **Dieter, George E.** *Mechanical Metallurgy.* s.l. : McGraw-Hill, 1961.
6. **American Society for Metals.** *ASM Specialty Handbook, Aluminium and Aluminium Alloys.* 1996.
7. **Vucetich, Danilo Alvaro, Feloy, Lucas y Gonzalez, Alfredo Carlos.** Mechanical properties vs torque analysis during friction stir welding of aluminum plates. *11th International Symposium on Friction Stir Welding.* Cambridge : s.n., 2016, pág. 11.



## EEFECTO DEL SOLUBILIZADO EN LA ESTRUCTURA DE LA ALEACION CuCrZr

Mayo Diaz, Mariano A., Maffía Ernesto G.

ProInTec I&D, Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, (UNLP), 1900, BA, Argentina

marianoadolfo@hotmail.com

### INTRODUCCIÓN

El solubilizado es un método que se utiliza para aumentar la resistencia y dureza de aleaciones metálicas utilizando calentamientos durante tiempos relativamente cortos. Este tratamiento térmico consiste en obtener una solución sólida a partir de una aleación, con una cantidad sustancial de componentes endurecedores disueltos en la matriz que después serán forzados a precipitar por toda la matriz en forma fina y dispersa. En cualquier aleación tratable térmicamente, cuanto mayor sea la cantidad de ingredientes endurecedores puestos en solución sólida, mayor será la potencialidad de la aleación para el endurecimiento.

La solución sólida se prepara mediante un "solubilizado" del metal. Este término indica que el material a tratar debe calentarse a temperaturas dentro de la región monofásica del diagrama correspondiente y estas varían con la aleación utilizada, pero pueden considerarse generalmente aquellas temperaturas que estén ligeramente por debajo del punto de fusión de la aleación. En cuanto al tiempo, este será dependiente de la temperatura, y cuanto mayor sea la temperatura de tratamiento, más corto debe ser el tiempo de retención. Después de haber formado la solución sólida, debe evitarse que los ingredientes endurecedores precipiten nuevamente en forma ineficaz; esto sucede cuando se deja enfriar la aleación lentamente a través del intervalo de temperaturas en donde la precipitación se forma rápidamente.

El tratamiento térmico de solubilizado en la aleación CuCrZr tiene como objetivo disolver el Cr y del Zr en el cobre para después hacerlos precipitar. Por un lado, el Cr lo hace en forma elemental y el Zr como compuestos  $Cu_xZr$ , en las imperfecciones de la matriz de cobre. El efecto de esta precipitación se pone de manifiesto, en este caso, con medidas de dureza. El objetivo de este trabajo es determinar el tiempo y la temperatura óptima de tratamiento térmico de endurecimiento por precipitación y su resistencia a la degradación ante la aplicación de múltiples ciclos térmico.

### PARTE EXPERIMENTAL

El material utilizado en este trabajo es un producto comercial de la aleación CuCrZr (C18150) obtenido de una empresa que se dedica a la fabricación de aleaciones de base cobre. La misma fue adquirida en calidad de solubilizada y envejecida con una dureza de 81 HRB. Las durezas relevadas fueron hechas mediante un equipo marca BSG, en la escala HRB según lo recomendado por la norma ASTM E 18 para aleaciones base cobre, utilizando una carga de 100 kg y un penetrador de bolilla 1/16". La tabla 1 muestra los valores de composición química dados por la especificación C18150 publicada en el sitio web matweb.com; asimismo en el laboratorio se realizó una medición utilizando un equipo de fluorescencia de rayos X (Bruker - Titan, S1) para corroborar si el material en cuestión tiene la composición química dada por las especificaciones de la literatura americana. Por los tratamientos térmicos se utilizaron hornos a resistencia, sin atmósfera controlada.

Tabla 1. Composición química de la aleación CuCrZr C18150.

Elementos de aleación	Composición nominal de aleación C18150 según Matweb.com*1 [%]	Composición medida en laboratorio [%]
Cr	0.5 - 1.5	1.03
Zr	0.05 - 0.25	0.14
Si	0.20 - 0.35	0.16
otros		0.35
Cu	Resto (98.25 - 99.45)	Resto (98.32)

## RESULTADOS Y DISCUSION

Se realiza un estudio de la cinética de disolución de precipitados endurecedores, partiendo de una muestra en estado de solubilizada y envejecida de la aleación CuCrZr. En la figura 1 puede observarse claramente que la velocidad de disolución de solutos, en los estadios iniciales del ciclo térmico, (representada por la pendiente de las curvas) aumenta con la temperatura. La aplicación de temperaturas crecientes en cada ciclo de solubilizado y temple, promueve un ablandamiento del material, cada vez a tiempos más cortos. El resultado es una solución sólida extremadamente blanda, en una condición ideal para el conformado en frío. Estos datos nos muestran lo riesgoso de los calentamientos inesperados en piezas fabricadas con materiales, pues se genera una significativa pérdida de propiedades debido a la elevadísima velocidad de disolución de los precipitados endurecedores.

La figura 1 muestra que todas las curvas presentan un comportamiento asintótico y convergente a  $30 \pm 5$  HRB. Este comportamiento indica el tiempo total del tratamiento térmico de solubilizado, el cual debe ser valorado con sumo cuidado. Este tiempo total se determina donde la velocidad de disolución disminuye, con tendencia cero. Este valor indica el fin de la disolución de solutos para una temperatura determinada y de seguir con el tratamiento, comenzaran a degradarse otras características de la estructura, como ser el tamaño del grano.

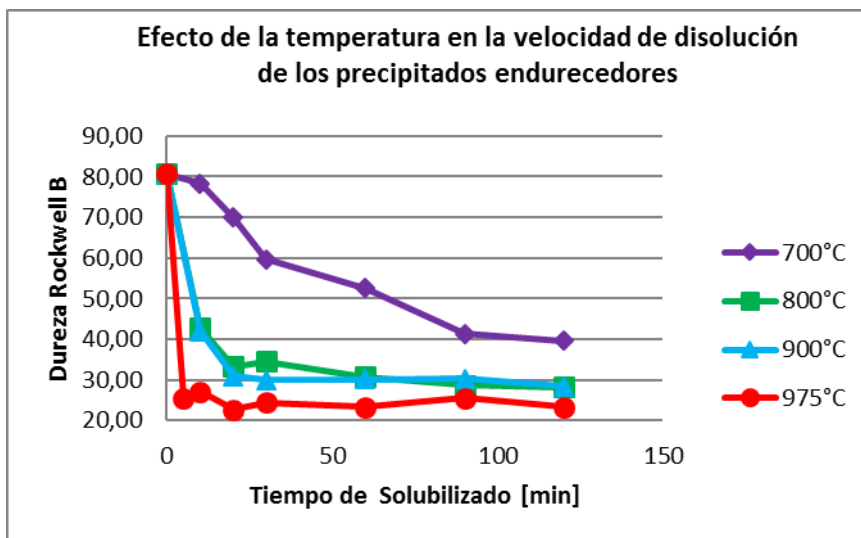


Figura 1. Valores de dureza para muestras sometidas a ciclos de solubilizado a diferentes tiempos y temperaturas

En la figura 2, los valores resultantes de dureza exhibidos por las muestras solubilizadas a 975°C, luego de un ciclo de envejecido a 500°C durante 3 horas, indican que, tanto en cortos como en extensos tiempos de solubilizado, la dureza no se modifica demasiado. Esto sugiere que el volumen total de precipitados endurecedores disponibles ya a los 5 minutos de solubilizado, es constante y único, pues se observa que aun continuando el tratamiento hasta los 120 minutos no se producen cambios significativos en la dureza final.

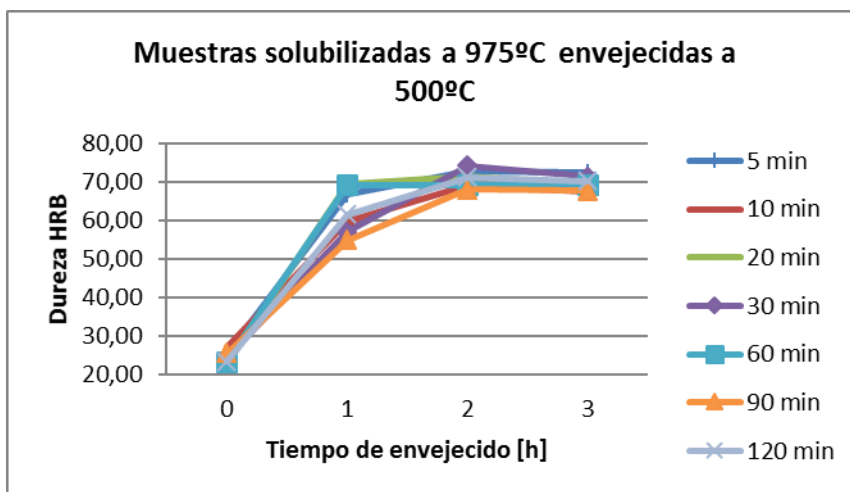


Figura 2. Valores de dureza para muestras solubilizadas a 975°C durante diferentes tiempos y envejecidas a 500°C en 3 ciclos consecutivos de 1 hora cada uno.

### Aplicación de ciclos múltiples de solubilizado y envejecido: su efecto en la estructura

Se someten muestras, ya solubilizadas y envejecidas, a tres ciclos térmicos de endurecimiento por precipitación. Los ensayos muestran una evolución creciente de la dureza, hecho que es muy evidente en aquellas solubilizadas a 900°C durante 10 minutos (color celeste en el gráfico de la figura 3). Los resultados sugieren que cada ciclo

completo aporta precipitados coherentes al siguiente ciclo, generados en cada nuevo ciclo de solubilizado y temple, por causas no conocidas

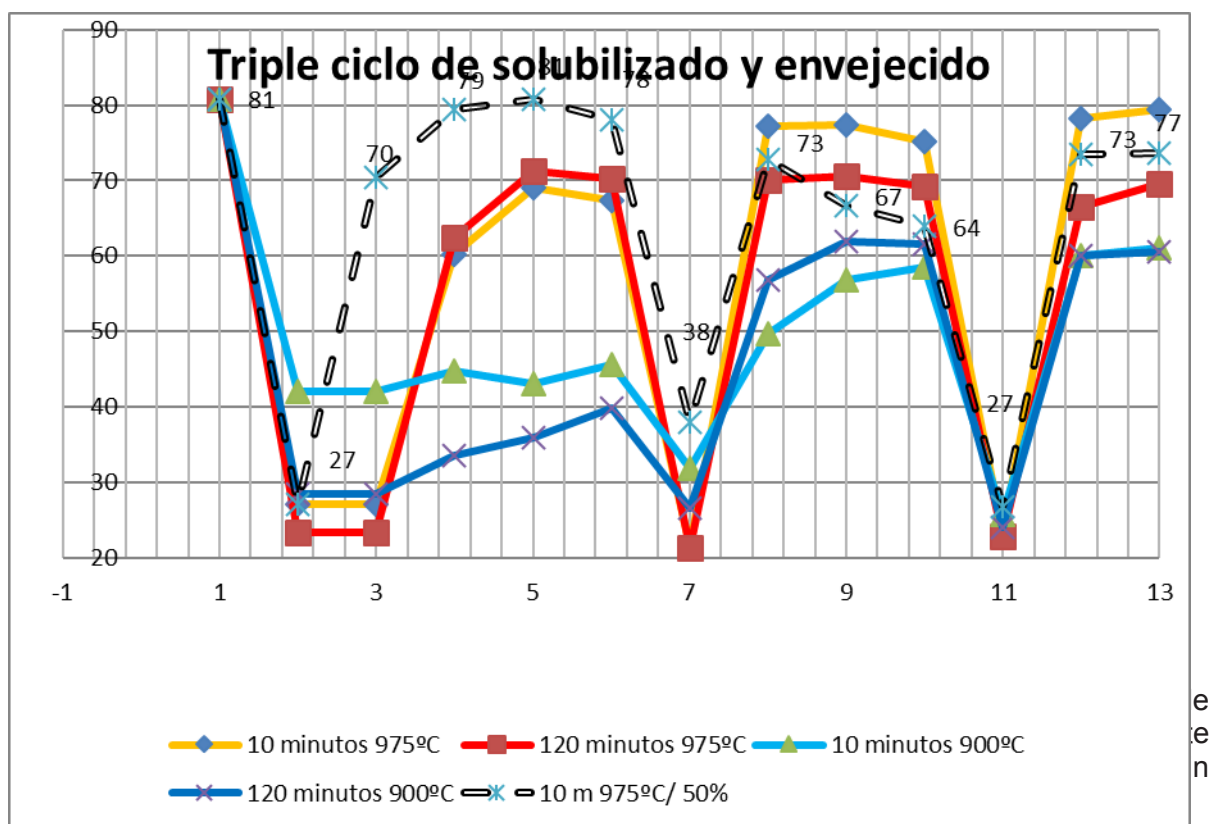


Figura 3. Valores de dureza para muestras que fueron sometidas 3 veces a ciclos de solubilizado a 900°C y 975°C durante diferentes tiempos y envejecidas a 500°C en 3 ciclos consecutivos de 1 hora cada uno de ellos.

Esta situación parece indicar que no se logra colocar en solución todo el soluto disponible para el envejecido en un solo ciclo térmico, pero la reiteración de los ciclos logra este cometido. Se observa que la estructura de la aleación resiste cuatro ciclos térmicos sin mostrar signo alguno de deterioro en la dureza.

Se comprueba también, que no solo es la alta temperatura la causante de la disolución de precipitados sino la reiteración de ciclos formados por la conjugación de “altas temperaturas de solubilizado aplicadas a tiempos muy cortos”. Esta condición opera generando una mayor disponibilidad de solutos endurecedores tras cada ciclo. Una explicación posible ante este evento podría ser que tener precipitados coherentes y no coherentes disponibles después de cada ciclo, aumenta el volumen de precipitados que van a solución.

También se demuestra que, aumentando el tiempo de permanencia a 975°C. (línea roja) no se consigue endurecer más la aleación pues cuando se somete una muestra a una temperatura de 975°C y tiempos de 120 minutos, el endurecimiento es constante en cada ciclo (como se observa en la línea roja del gráfico de la figura 3) lo que estaría indicando que no hay justificación para su utilización.

Quedan otras cuestiones a responder: ¿Que sucede en la microestructura sometida a tiempos muy prolongados a 975°C? La respuesta es que hay un volumen fijo y único de precipitados a disolver a cada temperatura y para ese volumen de precipitados, siempre habrá un único tiempo. Aplicar tiempos mayores (en este caso 120 minutos), no aportan mayor disolución de segundas fases.

Se comprueba también que una deformación plástica (60%) ayuda a la cinética de precipitación, comprobándose que la generación de defectos microestructurales influye en la cinética de precipitación.

## CONCLUSIONES

Del estudio realizado sobre la aleación termotratable CuCrZr, resulta evidente que los sucesivos tratamientos térmicos de solubilizado y envejecido afectan de alguna manera la microestructura de la aleación

Por lo tanto, los ensayos realizados indican que para cada temperatura de solubilizado, hay un único tiempo de tratamiento. Estos dos parámetros, son las variables que determinan el volumen de precipitados endurecedores disponibles para aumentar la dureza en cada ciclo. Además se observa que la deformación plástica después del solubilizado aumenta la cinética de precipitación, al aumentar la cantidad de sitios de nucleación para los precipitados coherentes.

## Bibliografía

- *ASM Metals Handbook- Tomo 02: Properties and Selection- Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials - Páginas 831 y 991 a 995*
- *ASM Metals Handbook- Tomo 06 - Welding, Brazing, and Soldering - Página 726 y 2063 a 2069*
- *William D. Callister, Jr.- Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales - Capítulos 5, 6, 7 y 11.*
- *Corson, Michael G. - USPTO: 1.658.186 - Copper alloy and process of producing and treating the same.*
- *Atomic scale investigation of Cr precipitation in copper. A. Chbihi , X. Sauvage, D. Blavette. Acta Materialia, Volume 60, Issue 11, June 2012, Pages 4575–4585*



## LA ESCUELA UNIVERSITARIA DE OFICIOS, COMO GENERADORA DE PERSPECTIVAS LABORALES ALTAMENTE CALIFICADAS

Nelson Castán<sup>(1)</sup> – Juan Marcelo Ratti<sup>(1)</sup> - Gustavo Mazante<sup>(1)</sup> - Andrés Delconte<sup>(1)</sup> – Sergio Serrichio<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> ProInTec I&D, Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, (UNLP), 1900, BA, Argentina

<sup>(2)</sup> Director Escuela Universitaria de Oficios, Prosecretaría de Políticas Sociales, Secretaría de Extensión, Universidad Nacional de La Plata.

### RESUMEN:

La UIDET ProInTec I&D, acompaña desde su comienzo a la Escuela Universitaria de Oficios (EUO), participando con distintos docentes y especialidades, que integran la misma. La EUO brinda cursos en diversas áreas, capacitando en oficios artesanales e industriales, en el marco de su política de extensión universitaria. Destinado a personas en situación de vulnerabilidad social, atendiendo situaciones particulares de escolarización, y al alcance de todos los que deseen capacitarse en oficios. Dentro de estos cursos se encuentra la rama eléctrica la cual se compone de tres niveles de aprendizaje.

Los primeros dos están destinados a otorgar conocimiento en materia de instalaciones domiciliarias y pequeñas cargas puntuales, desde su cálculo hasta su ejecución; obteniendo la acreditación para tramitar la matrícula como Electricista Instalador a nivel provincial. Estos dos niveles son ofrecidos en distintos clubes de barrios, donde trabaja la UNLP.

El tercer nivel es brindado en la Facultad de Ingeniería de la UNLP, bajo la supervisión de los docentes pertenecientes a la UIDET ProInTec I&D. Este nivel tiene como objetivo la enseñanza del oficio de electricista industrial, abriendo un abanico de oportunidades laborales para los estudiantes a diferencia de aquellos que deciden permanecer con los primeros dos niveles. Dicho curso les permite a los estudiantes adquirir conocimientos en instalaciones de industrias, edificios, automatización y ser emprendedores de sus propias tareas. Los alumnos se capacitan tanto en la adquisición de la técnica para el desarrollo de las actividades como en el trato hacia los clientes, la elaboración de presupuestos, seguridad e higiene, etc. Además los alumnos del nivel tres tienen la posibilidad de utilizar las herramientas e instrumental que posee la UIDET ProInTec I&D para la realización de sus trabajos y que son de poca recurrencia en otros cursos de la misma altura.

A comparación de los estudiantes del nivel dos, los del nivel tres tienen la posibilidad gracias a los conocimientos adquiridos de poder encarar labores más acorde a la geografía en la cual se encuentran, dado la cantidad de sectores industriales que se encuentran en el Gran La Plata.

En el presente trabajo se expondrá el paso de los estudiantes por los cursos dictados, haciendo mención a los conocimientos adquiridos, el mercado laboral al cual se insertan gracias a los cursos, experiencias de trabajo y como los estudiantes disipan los miedos o desconfianzas personales a la hora de encarar trabajos que se presentan.

**PALABRAS CLAVES:** Escuela de Oficios, Extensión Universitaria.

## INTRODUCCION

La Escuela Universitaria de Oficios (EUO) nace a partir de la necesidad de capacitar en oficios a una franja importante de la sociedad, que por razones económicas y/o sociales resultaron excluidos del sistema educativo, escolar y profesional.

Con un enfoque social, esta área de la Universidad Nacional de La Plata pretende acercar los servicios a los distintos barrios del Gran La Plata y además del dictado de oficios poder captar futuros estudiantes de esta casa de altos estudios.

### *Elección de los cursos para cada barrio en particular*

El abanico de cursos que brinda la EUO abarca diversas especialidades desde las más comunes que puedan existir hasta oficios que han surgido con los nuevos tiempos y los adelantos tecnológicos. Además de la diversidad en oficios que se brinda a todos por iguales, la EUO realiza un relevamiento de cada sector / barrio donde se determina que curso puede tener mayor aceptación y salida laboral. Es así que los cursos se van rotando en los distintos barrios del Gran La Plata y tomando como prioridad los cursos que posean mayor aprobación.

Se puede citar como ejemplo algún curso que se han elegido para la porción de la población que pueda requerir de estos especialistas; es el caso del curso "Herrador de Caballos", el cual se dicta en barrios cercanos al Hipódromo de La Plata o de fortines gauchos donde realicen actividades relacionadas al oficio.

### *Características del alumnado*

La elección de los alumnos que luego se distribuyen en los cursos elegidos, se realiza desde la Prosecretaría de Políticas Sociales de la UNLP, la cual aporta los profesionales que evaluarán el contexto socio – económico de cada inscripto y definirán si es apto para la realización de los cursos. Esto no implica ningún tipo de barrera u obstáculo para los interesados en realizar los cursos; tiene como objetivo seleccionar aquellas personas que realmente necesiten de un oficio para luego poder acceder a un empleo, y que se encuentren en situación de vulnerabilidad, lo que les implicaría poder tomar un curso o capacitación en institutos o centros de formación profesional. Cabe destacar que los cursos disponibles en la EUO son totalmente gratuitos para los interesados.

### *Situación de los cursos de oficios*

Se encuentran a disposición de la sociedad diferentes cursos de oficios con la duración de cuatrimestres, semestres y anuales. Dichos cursos además poseen varios niveles de aprendizajes que permiten capacitar y formar en oficio a las personas sin ningún tipo de conocimiento previo.

La metodología de trabajo consistía en brindar aquellos cursos de oficios, que para su normal desempeño laboral requerían de matrícula ante algún colegio regulador (Ejemplo: gasista, electricista, etc.), en Centros de Formación de Profesionales pertenecientes al Ministerio de Educación de la Provincia de Buenos Aires. Si bien los cursos se brindaban y continúan haciéndolo por los profesionales de estos centros, las inscripciones, seguimiento y provisión de materiales corre a cuenta de la EUO. Los restantes cursos que no requieren de inscripción ante los colegios reguladores (Ejemplo: serigrafía, repostería, carpintería, etc.), se dictan en los centros de extensión de la UNLP, clubes barriales, etc.

## **METAS Y OBJETIVOS DE LA EUO**

### *Actualidad y proyección a futuro de los cursos*

A partir del año 2015 se comenzó a trabajar de forma conjunta con el Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social de la Nación con el fin de acreditar bajo su órbita los cursos que se brindaban a la fecha por parte de la EUO. De esta forma los alumnos de los diferentes cursos alcanzaban un certificado de aprobación con el aval de dicho organismo, el cual permite posteriormente poder tramitar las matrículas para ciertos cursos.

Así la EUO puede brindar los diferentes cursos con o sin obtención de matrícula en los diferentes barrios del Gran La Plata; sin necesidad de depender de los centros de formación profesional. Esto trae como beneficio poder rotar el dictado de los cursos en cada periodo de manera de cubrir con todas las especialidades la mayor área interviniente, brindándole a la comunidad la posibilidad de acceder a diversos cursos.

### *Intervención de las distintas dependencias de la UNLP*

La EUO trabaja además con las distintas dependencias que posee la UNLP en la Ciudad de La Plata, aprovechando las instalaciones que estas poseen, las herramientas de aprendizaje y el personal docente y no docente que trabajan en cada una de las unidades. De esta manera se trabaja con las Secretarías de Extensión de cada unidad, para aprovechar al máximo el potencial que cada una posee. El personal interviniente para el dictado de los cursos, los docentes, son personas que trabajan en los diferentes grupos de investigación y desarrollo (unidades UIDET I&D), profesionales particulares, estudiantes de las diversas carreras universitarias y profesionales en general. En cada especialidad de los cursos que se brindan, se utilizan las instalaciones de la UNLP para desarrollar el último nivel de los cursos más específicos o con cierto grado técnico. Así los alumnos que hayan cursado los cursos en sus barrios, tienen la posibilidad de acercarse a las Facultades, usar sus instalaciones y adquirir una profundización en los conocimientos que ya venían trabajando desde los cursos anteriores.

### *Edificio propio*

Uno de los objetivos de la Escuela de Oficios es la de concretar la creación de un inmueble que albergue el sector administrativo, la parte de gestión y aquellas aulas destinadas a los cursos que poseen nivel tres y que actualmente se brindan en las instalaciones de las Facultades de la UNLP. De esta manera se obtendría equipamiento propio, materiales destinados exclusivamente a los cursos, instalaciones aptas para el dictado de los cursos, etc.

## **DESARROLLO DEL CURSO: ELECTRICISTA NIVEL III**

### *Generalidades*

Como se mencionaba anteriormente los cursos que requieren de cierta capacitación técnica y que luego estarán habilitados para obtener su matrícula, se dictan en las instalaciones de las dependencias de la UNLP. Esto es, aquellas Facultades que tengan injerencia en los temas desarrollados en los cursos, como por ejemplo, electricista nivel industrial se dicta en la Facultad de Ingeniería, herrador de caballo en la Facultad de Veterinaria, reparación de PC en la Facultad de Informática, etc. El dictado se brinda en las mismas aulas que son utilizadas para los cursos de grado que se dictan; además de aulas se tiene acceso a talleres y laboratorios

equipados con herramientas, máquinas, instrumental, que son poco habituales en los centros de capacitación o clubes de barrio donde se dictan también cursos.

### *Dictado del curso Electricista Industrial – Nivel III*

Como se mencionaba en el resumen del presente trabajo, la rama de Electricidad se compone de tres niveles. Los primeros dos se dictan en barrios y centros comunitarios, el nivel tres como se comentaba anteriormente se brinda en la Facultad de Ingeniería (en este caso, para esta especialidad), por personal perteneciente al Grupo de Investigación y Desarrollo UIDET ProInTec I&D. Dentro de este grupo se encuentra el Área de Servicios Tecnológicos del grupo, el cual posee profesionales en el tema que han tenido experiencia en el ámbito industrial y a su vez hay docentes de la casa en materias del área electricidad.

### *Instalaciones disponibles*

Para el dictado del curso la Facultad de Ingeniería pone a disposición de la Escuela de Oficios aulas y laboratorios que aporten en el aprendizaje del oficio. En este caso, para el curso de Electricista nivel III se dispone de las instalaciones del Laboratorio de Máquinas Eléctricas donde se tiene acceso a los equipos e instrumental eléctrico que les permiten a los alumnos practicar y comprender ciertos temas que de forma teórica pudiera ser engorroso.

En este lugar los cursantes pueden realizar prácticas relacionadas al montaje de motores eléctricos y su conexión, manejo de instrumentos de mediciones eléctricas, diseño y armado de circuitos de automatismo, uso de Programadores Lógicos Computarizados (PLC), etc.

### *Metodología de enseñanza*

Durante el transcurso de las primeras clases se comienza por recuperar los conocimientos previos de los alumnos, compartiendo entre todos los presentes las experiencias personales de cursos anteriores y de trabajos realizados. Las clases que se dictan se dividen en teóricas y prácticas, alternándolas durante los días que se dictan. La exposición de los temas teóricos se realiza presentando los conceptos básicos para su comprensión en conjunto con la realización de ejercicios prácticos con casos concretos de la vida cotidiana, combinado con entrega de material de lectura que sirve de complemento con las clases teóricas.

Dependiendo de la matrícula de estudiantes, se realizan grupos para fomentar en el alumno la resolución y desenvolvimiento de trabajos en equipo. En varias prácticas no se requiere la utilización de elementos con tensiones peligrosas, por lo tanto se deja que los alumnos procedan y descubran las mejores técnicas de trabajo y manipulación de los materiales, utilizando los errores que pudieran surgir como un aprendizaje a futuro. De igual manera se cuenta en todo momento con la supervisión de los instructores, realizando observaciones y corrigiendo cuestiones cuando sea necesario. Priorizando en todo momento la seguridad en la manipulación de elementos, circuitos, etc., y conociendo los riesgos que esta conlleva.

### *Temas intervinientes en el nivel III*

El curso se divide en tres módulos englobando los grandes temas de interés, pudiendo los temas moverse o profundizando aún más según el grado de comprensión y entendimiento, o el interés que posean los estudiantes para ciertos temas; aun así la totalidad de los temas se dictan y se entrega material complementario para su estudio.

Los módulos son los siguientes:

▪ **Fundamentos Teóricos:**

Comenzando el curso se desarrollan clases teóricas presentando al alumno conocimientos básicos e intermedios, realizando presentaciones de Power Point, explicaciones y ejercicios en pizarrón.

▪ **Canalizaciones:** Luego de obtenidos algunos conocimientos teóricos se continúa con la presentación de los aspectos prácticos que conforman una instalación eléctrica.

Las clases destinadas al presente módulo se dividen en la presentación de las diferentes canalizaciones que se pueden encontrar en instalaciones domiciliarias e industriales. Luego los alumnos acceden a los accesorios mediante los cuales desarrollarán las prácticas simulando el montaje de una instalación eléctrica.

▪ **Circuitos eléctricos:** El presente módulo pretende introducir el manejo de sistemas trifásicos en las instalaciones eléctricas, y continuando el aprendizaje en circuitos monofásicos, otorgando a los alumnos los conceptos necesarios para comenzar a realizar prácticas. Y enseñando a priorizar la seguridad por encima de todo, manejo de elementos de maniobra y protección de sistemas trifásicos.

▪ **Tableros y equipos eléctricos:**

Continuando con el aprendizaje práctico, el presente módulo aborda conocimientos relacionados al montaje de tableros eléctricos por parte de los estudiantes.

A partir del conocimiento adquirido sobre equipamientos eléctricos (interruptores, borneras, seccionadores, etc.), se le plantea al alumno que conforme un sistema eléctrico a partir del aprendizaje individual de cada componente; resolviendo según cada caso en particular.

Al mismo tiempo, se expone un panorama del equipamiento eléctrico existente que pueden encontrar en domicilios e industria, como lo son motores eléctricos, transformadores, etc.

El grado de abarque que posee el módulo, como el curso en sí, es para sistemas eléctricos en Baja Tensión.

▪ **Automatismos eléctricos:** Se introduce los conceptos de automatismos con contactores y PLC. El estudiante recibe en explicaciones teóricas los diferentes elementos que conforman la parte de automatismo, para luego poder resolver casos particulares en la vida laboral. Se complementa con clases prácticas donde el alumno desarrolla ejercicios como arranque de motores, sistemas de bombas de aguas, etc. Brindándole al mismo tiempo conocimientos prácticos de montaje, seguridad eléctrica y desenvolvimiento en el sector de trabajo.

▪ **Mantenimiento, gestión del trabajo y presupuestos:** Una vez obtenidos los conocimientos técnicos el alumno debe estar capacitado para realizar todo lo referido a la gestión del trabajo (sea mantenimiento o nueva ejecución de trabajos), realizando la planificación de la obra para conocer el periodo de ejecución, costos demandados, cantidad de trabajadores, etc.

### *Materiales didácticos*

Durante el curso se utilizan los siguientes elementos, los cuales varían en cantidad según el número de estudiantes:

Apuntes de clases, las presentaciones realizadas se les entrega a los alumnos junto a material adicional de lectura. Motores eléctricos. Elementos de protección, fusibles cilíndricos y NH, guardamotor, seccionador, etc. Automatismo: contactores, temporizadores. PLC. Jabalina para puesta a tierra, con accesorios. Equipo didáctico de laboratorio de circuitos y motores.

### *Evaluación de conocimientos*

El proceso de evaluación se desarrolla a lo largo de todo el curso donde se considera la participación en las clases de cada estudiante, su interés en cada tema y la predisposición a encarar las prácticas programadas. Finalizando el cronograma del curso se pretende que el alumno desarrolle una práctica que incluya algún tema central o englobe varios de ellos y lo



pueda ejecutar explicando su funcionamiento. La evaluación general es de carácter conceptual teniendo en cuenta las aptitudes logradas por cada alumno a lo largo del curso.

## CONCLUSIONES

El desarrollo de los cursos deja un aprendizaje técnico y humano, tanto para los alumnos como para los docentes. En cada curso en particular se conocen anécdotas y vivencias de los alumnos en el desarrollo de su nuevo oficio o en la profundización de sus conocimientos.

De los testimonios recabados se puede afirmar que los alumnos que realizaban algunos trabajos de características “pequeñas”, hoy día se afianzan en sus conocimientos y se animan a realizar labores que antes rechazaban por la falta de confianza en sí mismos. Para los alumnos resulta de una herramienta importante la que reciben de la Escuela de Oficios, ya que a partir de su paso por esta, pueden trabajar de forma independiente, lograr beneficios y poder crecer como persona en el ámbito laboral y personal.

## BIBLIOGRAFIA

- Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social (MTEySS). Programa de Cursos de *electricistas (nivel 3)*.

## DISEÑO CONSTRUCTUAL DE ÁLABES DE TURBINA DE GAS REFRIGERADOS MEDIANTE CONDUCTOS ELIPTICOS

Cristian Bosc<sup>1</sup> ;

1-UIDET-IAME, Facultad de Ingeniería de UNLP, Calle 1 y 47, La Plata, CP 1900, Argentina  
cristian.bosc@ing.unlp.edu.ar

### INTRODUCCIÓN

Las turbinas de gas (en adelante TG), son máquinas térmicas utilizadas para transformar la energía liberada en la combustión de un hidrocarburo, en potencia o trabajo. La parte crítica en el diseño de una TG, recae en las secciones expuestas a condiciones extremas. La temperatura de entrada al rotor (RIT, por sus siglas en inglés, “rotor inlet temperature”) es la variable crítica que limita la eficiencia y la durabilidad. La eficiencia está limitada por la máxima temperatura que pueden soportar los materiales de los álabes sin ablandamiento, fluencia o desgaste prematuro, mientras que la durabilidad recae, debido a que a mayor RIT la probabilidad de falla por fatiga se incrementa. En la actualidad la RIT está por encima de la temperatura de ablandamiento del material (softening point material), gracias a técnicas de recubrimientos cerámicos de baja conductividad térmica, Termal Barrier Coating (TBC) y a refrigeración interna y externa de los álabes, llegando en turbinas modernas a superar los 1400 °C. La refrigeración interna consiste de la circulación de un fluido, que usualmente es aire el cuál proveniente de una extracción del compresor, por conductos practicados internamente en los álabes. Debido a que este no es utilizado para generar potencia, es necesario optimizar las técnicas de refrigeración con el fin de utilizar la menor cantidad de extracción de aire y no incurrir en una baja en la eficiencia global de la TG.

El objetivo del presente trabajo es optimizar la configuración de los conductos de refrigeración, minimizando la máxima temperatura sobre el álabe (mínimum local hot-spot hoverheating) mediante la optimización de 5 grados de libertad geométricos y la eficiencia de evacuación de calor. La resolución de la ecuación de difusión es llevada a cabo por el método de elementos finitos.

### 2. Nomenclatura

H	altura del álabe elemental
L	ancho del álabe elemental
H <sub>1</sub>	semieje vertical de la elipse 1
L <sub>1</sub>	semieje horizontal de la elipse 1
H <sub>0</sub>	semieje vertical de la elipse 0
L <sub>0</sub>	semieje horizontal de la elipse 0
H <sub>2</sub>	espesor de pared de elipse 1
k	coeficiente de conductividad
T	temperatura
$\dot{q}$	flujo de calor por unidad de área
x	coordenada de abscisas
y	coordenada de ordenadas
A	área del dominio
$\emptyset$	relación material cavidad/sólido del dominio
$\emptyset_0$	área adimensional de ¼ de elipse 0
$\emptyset_1$	área adimensional de ½ elipse 1
R	resistencia térmica
W	dimensión transversal al plano

#### *Sub-índices:*

0	elipse 0
1	elipse 1
max	máximo
min	mínimo

#### *Supra-índices:*

~	adimensional
---	--------------

El diseño de las superficies externas del álabe, borde de ataque, borde de fuga, y caras de presión y succión, responde a una especialidad, siendo definida principalmente por

consideraciones de dinámica de fluidos, y no relacionadas a la transferencia de calor. Procurando simplicidad en el análisis de transferencia de calor que se pretende realizar, se considera un álabe elemental rectangular con canales internos elípticos que siguen el patrón descrito en la figura 1 (a)

Se suponen idénticas condiciones sobre todo el largo del álabe, y se desprecia la transferencia de calor por conducción en sentido longitudinal del mismo, lo cual permite analizar únicamente una única sección transversal, convirtiendo al modelo de estudio en bidimensional. El análisis se realiza en régimen estacionario, con propiedades termo-físicas constantes. La superficie externa del álabe es completamente mojada por la corriente de gases calientes, mientras que el álabe es refrigerado internamente mediante el paso de aire por los conductos elípticos que recorren radialmente la longitud del álabe.

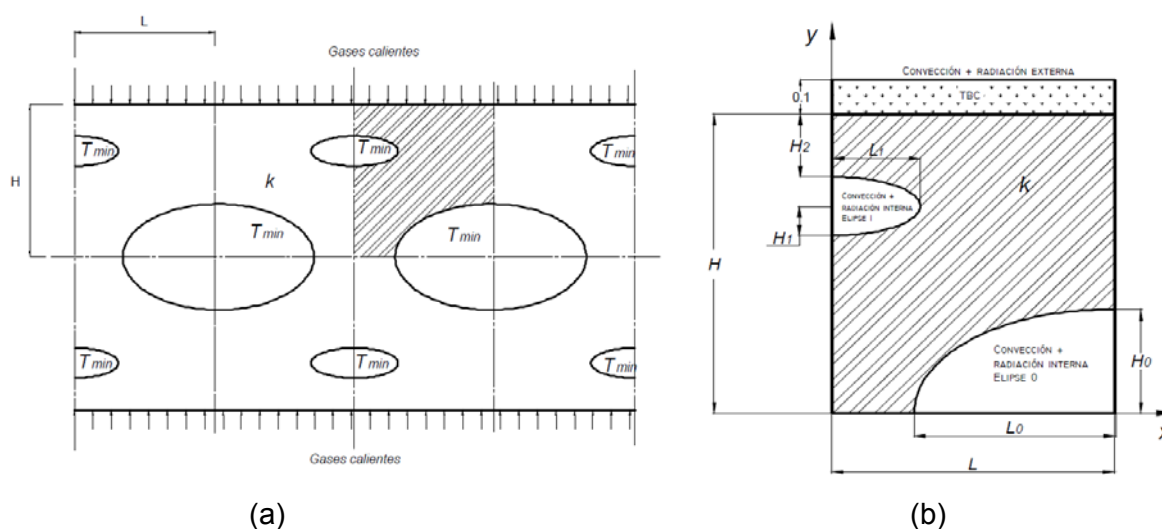


Figura 1: (a) Sección transversal del álabe elemental rectangular de largo  $4L$  y altura  $2H$  con conductos elípticos. (b): Dimensiones del dominio de estudio

En la sección transversal, se observan dos tipos de conductos elípticos, unos fijados en el centro del álabe, cuya área transversal define la elipse "0" y otros conductos de menor área transversal cuyo emplazamiento definitivo será optimizado, elipse "1". Debido a la existencia de simetría vertical y horizontal sobre el patrón de los canales, se estudia un octavo de la sección transversal de la figura 1 de altura  $H$  y base  $L$ . El dominio de estudio se muestra en la figura 1 (b) con sus variables dimensionales y condiciones de borde correspondientes. Las variables geométricas a optimizar son relación de aspecto del dominio ( $H/L$ ), tamaño de la elipse menor de semiejes ( $H_1, L_1$ ), Relación de aspecto de la elipse menor ( $H_1/L_1$ ), Tamaño de la elipse mayor de semiejes ( $H_0, L_0$ ), Relación de aspecto de la elipse mayor ( $H_0/L_0$ ) y espesor de pared entre la elipse "1" y la superficie externa ( $H_2$ ).

Un recubrimiento de barrera térmica (TBC) con material cerámico 7YSZ de espesor constante de 1 mm (valores típicos de TG estacionarias) es utilizado para reducir la máxima temperatura sobre el metal y protegerlo del ataque de los gases calientes. Las condiciones de borde, incorporan la transferencia de calor por convección y radiación tanto en el borde externo como en los conductos. El resto de las superficies del dominio son adiabáticas. En el borde externo la superficie es mojada por la corriente de gases calientes, cuya temperatura de estancamiento es  $T_\infty$ . El coeficiente de convección externo ( $h_e$ ) es supuesto constante a partir del número de Nusselt promedio para una placa plana en régimen turbulento a una distancia característica de  $4L$

$$Nu_u = 0.037 Re^{0.8} Pr^{1/3} = (h_e 4L)/k_\infty \quad (1)$$

Las magnitudes termo-físicas de la corriente de gases son:

$k_\infty = 0.07868$ ; conductividad térmica @ 1473 K, [W/m\*K];  $Re = 500000$ ; Número de Reynolds

Pr=0.726; Número de Prandtl del aire @ 1473 K

En el borde interno de los conductos, la superficie es mojada por una corriente de aire proveniente desde una extracción del compresor, cuya temperatura promedio de corriente libre es  $T_{min}$ . El coeficiente de convección interno ( $h_i$ ) para ambos tubos es obtenido a partir del número Nusselt promedio para tubos lisos circulares en régimen turbulento con un diámetro equivalente a partir del diámetro hidráulico promedio de ambos canales.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} = (h_i D_h)/k \quad (2)$$

El diámetro hidráulico de cada conducto elíptico es:

$$D_{h1} = \frac{4 L_1 H_1}{3(L_1+H_1)-\sqrt{(3L_1+H_1)(L_1+3H_1)}} \quad \text{y} \quad D_{h0} = \frac{4 L_0 H_0}{3(L_0+H_0)-\sqrt{(3L_0+H_0)(L_0+3H_0)}} \quad (3)$$

El diámetro promedio es:

$$D_h = \frac{D_{h1}+D_{h2}}{2} \quad (4)$$

*Nota: Para la determinación del perímetro de las elipses se utiliza la aproximación de Ramanujan.*

Las magnitudes físicas para la determinación del coeficiente de convección interno son:

k=0.006093; conductividad del aire @ 873 K en [W/m\*K]

Re=20000; Número de Reynolds

Pr=0.7037; Número de Prandtl del aire @ 873 K

La transferencia de calor sobre el sólido ocurre por conducción térmica. El material cerámico y metálico son considerados isotrópicos y con conductividad térmica constante. La conducción de calor sobre el dominio bajo las condiciones descritas, es enteramente por difusión, siendo la ecuación gobernante:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) = 0 \quad (5)$$

### Adimensionalización

Las variables son adimensionalizadas como sigue:

$$\text{Temperatura relativa del álabe} \quad \tilde{T} = \frac{T-T_{min}}{T_{\infty}-T_{min}} \quad (6)$$

$$\text{Tomando unitaria la distancia perpendicular al plano,} \quad W = 1 \quad (7)$$

Las longitudes son adimensionalizadas con las raíz del área del dominio  $A=H.L$

$$(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{H}, \tilde{L}, \tilde{H}_0, \tilde{L}_0, \tilde{H}_1, \tilde{L}_1, \tilde{H}_2) = \frac{(x,y,H,L,H_0,L_0,H_1,L_1,H_2)}{\sqrt[2]{A}} \quad (8)$$

A partir de las ecs. (6) y (8), la ecuación de difusión de calor, ec.(5) es adimensionalizada:

$$\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{x}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial \tilde{y}^2} = 0 \quad (9)$$

Las correspondientes condiciones de borde adimensionales son:

$$\text{"Adiabático"} \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{y}} = 0 \text{ para } \tilde{x} = 0; \quad 0 \leq \tilde{y} \leq \tilde{H} - \tilde{H}_1 - \tilde{H}_2 \quad \text{And} \quad \tilde{H} - \tilde{H}_2 \leq \tilde{y} \leq \tilde{H} \\ \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{x}} = 0 \text{ para } \tilde{y} = 0; \quad 0 \leq \tilde{x} \leq \tilde{L} - \tilde{L}_0 \\ \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{y}} = 0 \text{ para } \tilde{x} = \tilde{L}; \quad \tilde{H}_0 \leq \tilde{y} \leq \tilde{H} \end{array} \right. \quad (10)$$

"Convección + radiación externa:

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{y}} = -\alpha_e \tilde{T}^4 - \beta_e \tilde{T}^3 - \gamma_e \tilde{T}^2 - \delta_e \tilde{T} + \epsilon_e \quad (11)$$

Siendo las constantes:

$$\alpha_e = \frac{\sigma \varepsilon_e \sqrt{A} (\Delta T)^3}{k_e}; \beta_e = \frac{4 \sigma \varepsilon_e \sqrt{A} (\Delta T)^2 T_{min}}{k_e}; \gamma_e = \frac{6 \sigma \varepsilon_e \sqrt{A} \Delta T T_{min}^2}{k_e}; \delta_e = \frac{h_e \sqrt{A}}{k_e} + \frac{4 \sigma \varepsilon_e \sqrt{A} T_{min}^3}{k_e}; \text{ y}$$

$$\epsilon_e = \frac{h_e \sqrt{A}}{k_e} e + \frac{\sigma \varepsilon_e \sqrt{A} (T_{\infty}^4 - T_{min}^4)}{k_e \Delta T} \quad (12)$$

“Convección + radiación interna:

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{r}} = \alpha_i \tilde{T}^4 + \beta_i \tilde{T}^3 + \gamma_i \tilde{T}^2 + \delta_i \tilde{T} \quad (13)$$

Siendo las constantes:

$$\alpha_i = \frac{\sigma \varepsilon_i \sqrt{A} (\Delta T)^3}{k_i}; \beta_i = \frac{4 \sigma \varepsilon_i \sqrt{A} (\Delta T)^2 T_{min}}{k_i}; \gamma_i = \frac{6 \sigma \varepsilon_i \sqrt{A} \Delta T T_{min}^2}{k_i} \text{ y } \delta_i = \frac{h_i \sqrt{A}}{k_i} + \frac{4 \sigma \varepsilon_i \sqrt{A} T_{min}^3}{k_i} \quad (14)$$

Las magnitudes termo-físicas utilizadas son:

$k_c=2.5$ ; conductividad de recubrimiento cerámico 7YSZ @ 1473 K en [W/m\*K];

$k_m=21$ ; conductividad del metal Nimonic 90 @ 873 K en [W/m\*K]

$\varepsilon_c=0.6$ ; emisividad del recubrimiento cerámico @ 1473 K

$\varepsilon_m=0.87$ ; emisividad del metal Nimonic 90 @ 600 K;

$\sigma=5.670373e-08$ ; constante de Stefan-Boltzmann [W/K<sup>4</sup>\*m<sup>2</sup>]

$T_{\infty}=1473$ ; temperatura de estancamiento de gases calientes, K

$T_{min}=873$ ; Temperatura promedio de aire refrigerante, K

$\Delta T=T_{\infty}-T_{min}$ ; delta T máximo

### No linealidad

La no linealidad en las condiciones de borde radioactivas, es resuelta mediante el método iterativo de Gauss-Newton. El criterio de convergencia adoptado es:

$$\xi < \left| \frac{T - T^*}{T} \right| \quad (15)$$

Se adoptó  $\xi = 0.0001$  para todos los casos.

Condición “Convección + radiación externa:

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{y}} = -\alpha_e \tilde{T}^4 - \beta_e \tilde{T}^3 - \gamma_e \tilde{T}^2 - \delta_e \tilde{T} + \epsilon_e = S_e \quad (16)$$

El término fuente  $S_e$  es linealizado respecto a una iteración previa, de la siguiente forma:

$$\frac{S_e - S_e^*}{\tilde{T} - \tilde{T}^*} = \frac{dS_e^*}{d\tilde{T}^*} \quad (17)$$

Quedando la ecuación de borde linealizada de la forma:

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{y}} + Q_e \tilde{T} = G_e \quad (18)$$

Siendo las constantes:

$$Q_e = -4\alpha_e \tilde{T}^{*3} - 3\beta_e \tilde{T}^{*2} - 2\gamma_e \tilde{T}^* - \delta_e \quad (19)$$

$$G_e = 3\alpha_e \tilde{T}^{*4} + 2\beta_e \tilde{T}^{*3} + \gamma_e \tilde{T}^{*2} + \epsilon_e \quad (20)$$

Para el caso de la condición de borde en los conductos elípticos internos

Condición “Convección + radiación interna:

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{r}} = \alpha_i \tilde{T}^4 + \beta_i \tilde{T}^3 + \gamma_i \tilde{T}^2 + \delta_i \tilde{T} \quad (21)$$



El término fuente  $S_i$  es linealizado respecto a una iteración previa, de la siguiente forma:

$$\frac{S_i^* - S_i}{\tilde{T}^* - \tilde{T}} = \frac{dS_i^*}{d\tilde{T}^*} \quad (22)$$

Quedando la ecuación de borde linealizada de la forma:

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tilde{r}} + Q_i \tilde{T} = G_i \quad (23)$$

Siendo las constantes:

$$Q_i = 4\alpha_i \tilde{T}^{*3} + 3\beta_i \tilde{T}^{*2} + 2\gamma_i \tilde{T}^* + \delta_e \quad (24)$$

$$G_i = 5\alpha_i \tilde{T}^{*4} + 4\beta_i \tilde{T}^{*3} + 3\gamma_i \tilde{T}^{*2} + 2\delta_i \tilde{T}^* \quad (25)$$

### Restricciones

El dominio rectangular adimensional se vuelve unitario:  $1 = \tilde{H} \cdot \tilde{L}$  (26)

El área adimensional de  $\frac{1}{4}$  de la elipse "0" es:  $\phi_0 = \frac{\pi}{4} \tilde{L}_0 \tilde{H}_0$  (27)

El área adimensional de  $\frac{1}{2}$  de la elipse "1" es:  $\phi_1 = \frac{\pi}{2} \tilde{L}_1 \tilde{H}_1$  (28)

Se define la relación de material ( $\phi$ ) al cociente entre el área total de los canales elípticos y el área de dominio." Esta relación representa el porcentaje de cavidad que existe en el dominio sólido rectangular.

$$\phi = \phi_0 + \phi_1 \quad (29)$$

Siendo el tamaño y relación de aspecto de ambas elipses variables a optimizar, se estudian los valores de  $\phi_0$  que corresponden a un área de elipse "0" mayor o igual al área de elipse "1". Para ello, siendo las áreas totales de los canales elípticos:

$$A_0 = 4 \phi_0 \quad \text{y} \quad A_1 = 2 \phi_1 \quad (30)$$

Se debe cumplir:  $A_0 \geq A_1$  por lo tanto  $\phi_0 \geq \frac{1}{3} \phi$  (31)

La relación de las áreas de los canales elípticos en el dominio, ec.(32) representa el tamaño relativo entre ambos canales de refrigeración.

$$\frac{A_0}{A_1} = \frac{4 \phi_0}{2 \phi_1} \quad (32)$$

### Grados de libertad

Resulta de interés además analizar un indicador de eficiencia de la evacuación de calor, el cual se define por conveniencia como:

$$\xi = \frac{q/kW}{\tilde{T}_{\max} - \tilde{T}_{\min}} \quad (33)$$

Siendo,

$$k = 1 \left[ \frac{kJ}{mK} \right]; \quad W = 1 [dm]; \quad \tilde{T}_{\min} = 0$$

Por conveniencia para la manipulación de las variables a optimizar, se definen grupos de cocientes de variables adimensionales, que representan los 5 grados de libertad a optimizar  $\langle \phi_0, \frac{\tilde{H}}{\tilde{L}}; \frac{\tilde{H}_0}{\tilde{L}_0}; \frac{\tilde{H}_1}{\tilde{L}_1}; \tilde{H}_2 \rangle$  para diferentes valores de relación material (restricción  $\phi$ )

$$\{[\tilde{T}_{\max}]_{\min}; [\xi]_{\max}\} = f \langle \phi, \phi_0, \frac{\tilde{H}}{\tilde{L}}; \frac{\tilde{H}_0}{\tilde{L}_0}; \frac{\tilde{H}_1}{\tilde{L}_1}; \frac{\tilde{H}_2}{H} \rangle \quad (34)$$

La configuración más eficiente tendrá el mayor valor de  $\xi$ , pues representa mayor calor neto ingresado al dominio y mínima temperatura adimensional  $\tilde{T}_{\max}$ .

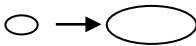
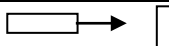

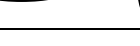

### METODOLOGÍA

El campo de temperaturas adimensionales sobre el sólido es obtenido mediante la resolución de la ecuación (9) con las condiciones de borde determinadas por las ecs. (10), (11) y (13), mediante el método de elementos finitos.

Se define la independencia de malla cuando, la diferencia entre dos soluciones con sucesivos incrementos en la cantidad de elementos (triángulos) es menor al 0,5%, es decir:

$$|(\tilde{T}_{max}^i - \tilde{T}_{max}^{i-1}) / \tilde{T}_{max}^{i-1}| * 100 < 0,5 \tag{35}$$

Tabla 1: Rangos de variación de grados de libertad y restricción

Rangos	Indicaciones
$\phi = [0.1 - 0.35]$	relación material (cavidad/sólido)
$\phi_0 = [\frac{\phi}{3} - 0.9\phi]$	tamaño de la elipse "0" 
$\frac{\tilde{H}}{\tilde{L}} = [0.3 - 2]$	relación de aspecto del dominio 
$\frac{\tilde{H}_0}{\tilde{L}_0} = [0.4 - 2]$	relación de aspecto de la elipse "0" 
$\frac{\tilde{H}_1}{\tilde{L}_1} = [0.4 - 2]$	relación de aspecto de la elipse "1" 
$\frac{\tilde{H}_2}{\tilde{H}} = [0.1 - \frac{(H - 2H_1)}{H}]$	espesor de pared entre elipse "1" y superficie externa 

### RESULTADOS

Los resultados arrojan que la  $\tilde{T}_{max}$  decrece monótonamente a medida que  $\tilde{H}_2$  es reducido, para diferentes valores de  $\frac{\tilde{H}}{\tilde{L}}$ ;  $\frac{\tilde{H}_0}{\tilde{L}_0}$ ;  $\frac{\tilde{H}_1}{\tilde{L}_1}$  y  $\phi_0$ . Este comportamiento evidencia la existencia de un mínimo absoluto en el extremo inferior del rango de variación de  $\tilde{H}_2$ .

Manteniendo constante el valor  $[\tilde{H}_2]_{opt} = 0.1$ , la mínima  $\tilde{T}_{max}$  se alcanza en todas las curvas de  $\phi_0$  constante, cuando  $\tilde{H}_0/\tilde{L}_0$  se encuentra en los extremos opuestos de su rango de variación, dependiendo del valor de  $\tilde{H}/\tilde{L}$ . Es decir,  $\tilde{H}_0/\tilde{L}_0$  óptimo pasa de 0.3 a 2 a medida que  $\tilde{H}/\tilde{L}$  se incrementa. En las figuras 2 (a), (b) y (c) se han graficado las variaciones de  $\tilde{T}_{max}$  con respecto a  $\tilde{H}_0/\tilde{L}_0$  para valores de  $\tilde{H}/\tilde{L}$  de 0.3, 1 y 2 respectivamente. Mientras que para  $\tilde{H}/\tilde{L} = 0.3$  el valor óptimo de  $\tilde{H}_0/\tilde{L}_0$  se encuentra en el extremo inferior del rango de variación, para  $\tilde{H}/\tilde{L} = 1$ , el valor óptimo de  $\tilde{H}_0/\tilde{L}_0$  pasa a encontrarse en el extremo superior del rango de variación. Cuando  $\tilde{H}/\tilde{L} = 2$ , la influencia de  $\tilde{H}_0/\tilde{L}_0$  es prácticamente nula.

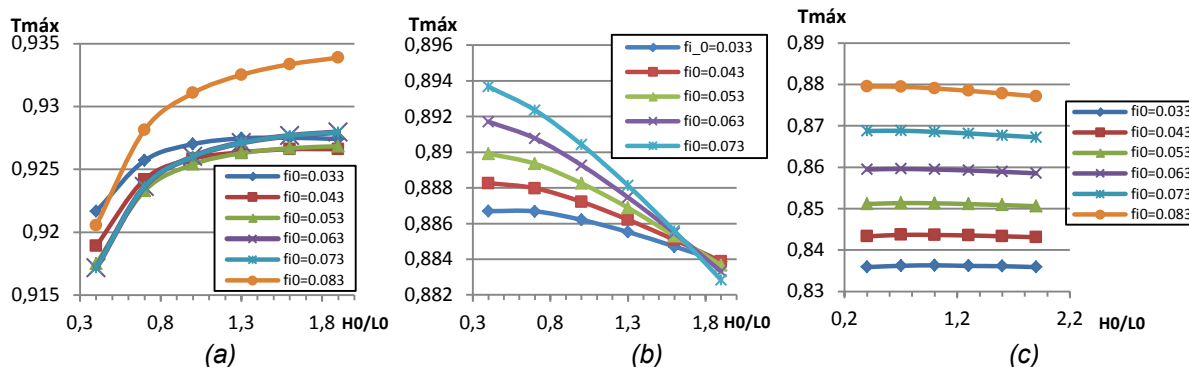


Figura 2: (a)  $\tilde{T}_{max}$  vs.  $\tilde{H}_0/\tilde{L}_0$  para diferentes  $\phi_0$  con  $\phi=0.1$ ;  $\tilde{H}_1/\tilde{L}_1=0.4$ ;  $\tilde{H}/\tilde{L}=0.3$ ; y  $\tilde{H}_2=0.1$ .  
 (b)  $\tilde{T}_{max}$  vs.  $\tilde{H}_0/\tilde{L}_0$  para diferentes  $\phi_0$  con  $\phi=0.1$ ;  $\tilde{H}_1/\tilde{L}_1=0.4$ ;  $\tilde{H}/\tilde{L}=1$  y  $\tilde{H}_2=0.1$ .  
 (c)  $\tilde{T}_{max}$  vs.  $\tilde{H}_0/\tilde{L}_0$  para diferentes  $\phi_0$  con  $\phi=0.1$ ;  $\tilde{H}_1/\tilde{L}_1=0.4$ ;  $\tilde{H}/\tilde{L}=2$ ; y  $\tilde{H}_2=0.1$

De la figura 3 (a), es inferido que para todas las curvas de  $\phi_0 = \text{cte}$ . decrece la máxima temperatura a medida que  $\tilde{H}_1/\tilde{L}_1$  es reducido. Se concluye que el valor óptimo de relación de aspecto de la elipse "1" corresponde al extremo inferior del rango de variación

$$\left[ \frac{H_1}{L_1} \right]_{opt} = 0.4$$

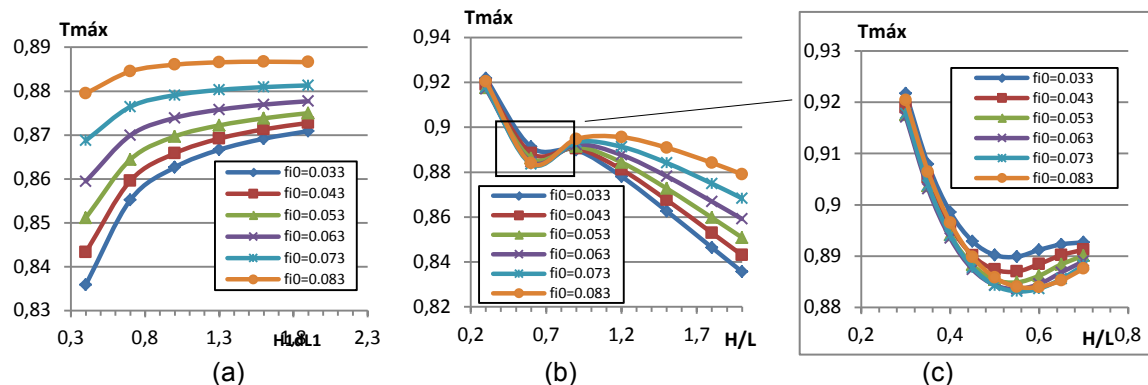


Figura 3 (a)  $\tilde{T}_{máx}$  vs.  $\tilde{H}_1/\tilde{L}_1$ , para diferentes  $\phi_0$  con  $\phi = 0.1$ ;  $\tilde{H}_2/\tilde{L}_2 = 0.4$ ;  $\tilde{H}/\tilde{L} = 2$ ; y  $\tilde{H}_2/H = 0.1$ .

(b)  $\tilde{T}_{máx}$  vs.  $\tilde{H}/\tilde{L}$  para diferentes  $\phi_0$ , con  $\phi = 0.1$ ;  $\tilde{H}_1/\tilde{L}_1 = 0.4$ ;  $\tilde{H}_2/\tilde{L}_2 = 0.4$ ;  $\tilde{H}/\tilde{L} = 0.4$  y  $\tilde{H}_2/H = 0.1$ .

(c) Ampliación de figura 3 (b).  $\tilde{T}_{máx}$  vs.  $\tilde{H}/\tilde{L}$  para diferentes  $\phi_0$ , con  $\phi = 0.1$ ;  $\tilde{H}_1/\tilde{L}_1 = 0.4$ ;  $\tilde{H}_2/\tilde{L}_2 = 0.4$ ;  $\tilde{H}/\tilde{L} = 0.4$  y  $\tilde{H}_2/H = 0.1$

El comportamiento de  $\tilde{T}_{máx}$  con la relación de aspecto del dominio  $\tilde{H}/\tilde{L}$  revela gran sensibilidad, tal como se muestra en la figura 3 (b). Las curvas de  $\phi_0$  constante evidencian en todos los casos, existencia de un mínimo local próximo a  $\tilde{H}/\tilde{L} = 0.5$  y un mínimo absoluto en  $\tilde{H}/\tilde{L} = 2$ . Un refinamiento en el rango del mínimo local, ha permitido realizar la figura 3 (c) donde expone para todas las curvas de  $\phi_0$  cte. la mínima  $\tilde{T}_{máx}$  en  $\tilde{H}/\tilde{L} = 0.55$ , siendo la curva de  $\phi_0 = 0.073$ , la que genera el menor valor.

El flujo de calor neto que ingresa al dominio, es función entre otras cosas, de la temperatura de la superficie (que no es impuesta) y del área de transferencia de calor, de largo  $L$  y profundidad unitaria ( $W$ ), por lo tanto, a medida que  $\tilde{H}/\tilde{L}$  aumenta, el borde exterior se reduce, y el calor neto ingresado al dominio disminuye. El mínimo absoluto de  $\tilde{T}_{máx}$  en el rango establecido, se alcanza con  $\phi_0 = 0.033$  y  $\tilde{H}/\tilde{L} = 2$  lo cual significa un conducto próximo al borde exterior de mayor tamaño y, menor calor neto ingresado, respectivamente. Con esta configuración, la mínima  $\tilde{T}_{máx}$  ocurre a expensas de un menor calor neto ingresado. Por lo expuesto, no resulta de interés valores de  $\tilde{H}/\tilde{L} > 1$ .

El indicador  $\xi$  de eficiencia de la evacuación de calor se representa en la figura 4 (a) en función de  $\tilde{H}/\tilde{L}$ .

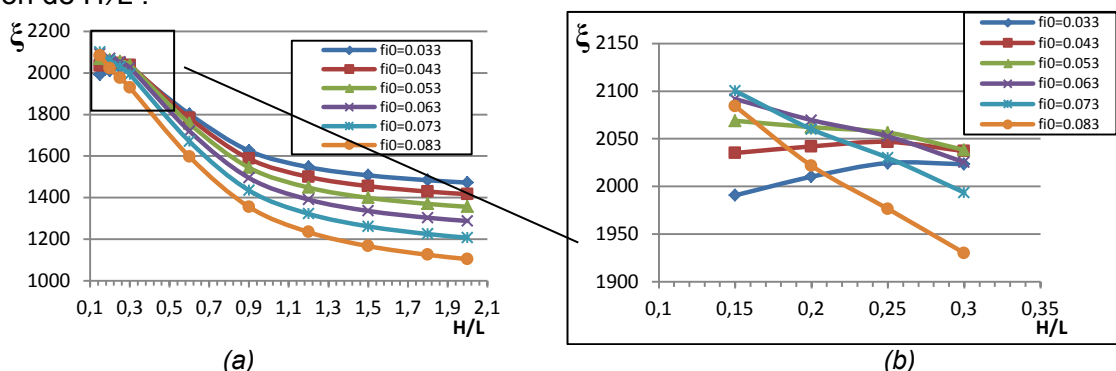


Figura 4 (a) Curvas de eficiencia de evacuación de calor en función de  $\tilde{H}/\tilde{L}$  para  $\phi_0 = \text{cte}$ . con  $\tilde{H}_2/\tilde{L}_2 = 0.4$ ;  $\tilde{H}_1/\tilde{L}_1 = 0.4$  y  $\tilde{H}_2/H = 0.1$ .

(b) Ampliación de figura 4 (a) en la zona recuadrada.

La figura 4 (b) se representa una ampliación de la zona recuadrada, donde se observan diferentes características a saber:

- Para  $\phi_0 = 0.033$  y  $0.043$  existe un máximo absoluto de eficiencia próximo a  $H\tilde{L} = 0.25$
- Para el resto de las curvas de  $\phi_0$  la eficiencia continua aumentado a medida que  $H\tilde{L}$  es reducido.

Es decir, sólo existe un máximo absoluto de eficiencia para curvas de  $\phi_0 \leq 0.043$ , mientras que el resto de las curvas, no presentan tal característica. Para  $\phi_0 = 0.073$  se puede encontrar en la figura 3 (b) que existen 2 valores de  $H\tilde{L}$  que generan la misma  $\tilde{T}_{m\acute{a}x}$ . En la tabla 2 se ven representados los valores para ambos puntos, siendo el valor de  $H\tilde{L} = 0.55$  un 24,5 % más eficiente respecto de evacuación de calor.

Tabla 2 diferentes valores de  $H\tilde{L}$  que generan idénticas  $\tilde{T}_{m\acute{a}x}$

$\phi$	$\phi_0$	H/L	H0/L0	H1/L1	H2	$\tilde{T}_{m\acute{a}x}$	q	$\xi$
0.1	0.073	0.55	0.4	0.4	0.1	0.883	1457	1671
0.1	0.073	1.5	0.4	0.4	0.1	0.883	1102	1261

Tal configuración generará para una longitud de álabes fija  $4L$ , mayor evacuación de calor, alcanzándose  $\tilde{T}_{m\acute{a}x} = 0.883$ , lo cual significa un punto caliente sobre el sólido del álabes 11.7% inferior, a la temperatura de estancamiento de los gases calientes.  $\tilde{T}_{m\acute{a}x}$  deberá encontrarse por debajo de la temperatura de ablandamiento del material, pudiendo en tal caso, recurrir a técnicas de refrigeración adicionales (film cooling, etc.).

Existen valores óptimos de  $\phi_0$  y  $H\tilde{L}$  que maximizan la eficiencia de evacuación de calor, no siendo estos coincidentes con aquellos que minimizan la  $\tilde{T}_{m\acute{a}x}$ .

Para diferentes valores de  $\phi$  los valores óptimos de relación de aspecto de ambas elipses y espesor de pared, continúan siendo óptimos para los valores inferiores de la escala, es decir  $\left[\frac{H_0}{L_0}\right]_{opt} = 0.4$ ;  $\left[\frac{H_1}{L_1}\right]_{opt} = 0.4$  y  $\left[\frac{H_2}{H}\right]_{opt} = 0.1$ . Sin embargo, para el tamaño relativo de las

elipses  $\phi_0$  y la relación de aspecto del dominio  $H\tilde{L}$  existe un único valor óptimo que minimizan  $\tilde{T}_{m\acute{a}x}$ , tal como se observa en las figuras 5 (a) y (b) y (c) y 6 (a) para valores de  $\phi$  de 1.5, 2, 2.5 y 3 respectivamente. En la figura 6 (b) se evidencia un crecimiento sostenido de la eficiencia de evacuación de calor, para todas las curvas de  $\phi$  y  $\phi_0$  óptimo, a medida que  $H\tilde{L}$  es reducido, no presentándose un máximo absoluto.

La tabla 3 resume el diseño Constructual para diferentes valores de  $\phi$ . En la figura 7 se muestran las isotermas generadas sobre los perfiles de la tabla 3

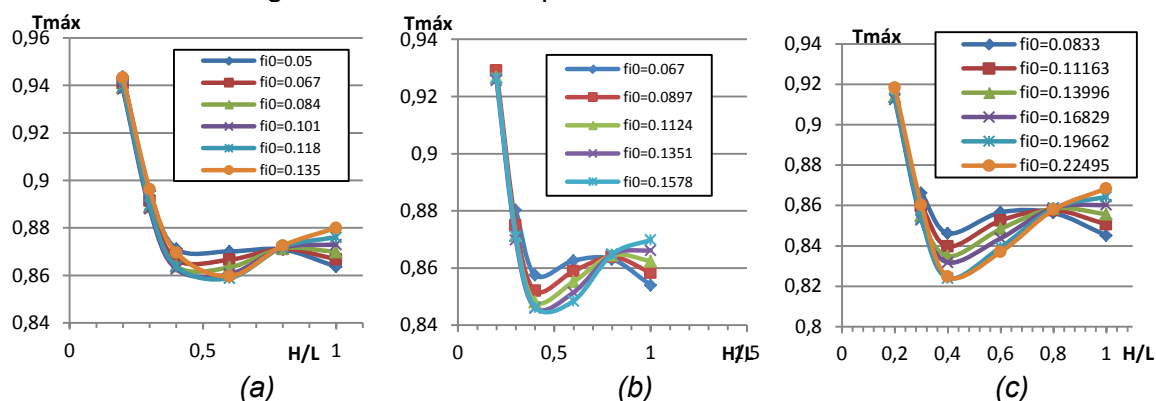


Figura 5 Curvas de: (a)  $\tilde{T}_{m\acute{a}x}$  en función de  $H\tilde{L}$  para diferentes  $\phi_0$  con  $\phi = 0.15$ ;  $H_0/L_0 = 0.4$ ;  $H_1/L_1 = 0.4$  y  $H_2 = 0.1$ .

(b)  $\tilde{T}_{m\acute{a}x}$  en función de  $H\tilde{L}$  para diferentes  $\phi_0$  con  $\phi = 0.2$ ;  $H_0/L_0 = 0.4$ ;  $H_1/L_1 = 0.4$  y  $H_2 = 0.1$ .

(c)  $\tilde{T}_{m\acute{a}x}$  en función de  $H\tilde{L}$  para diferentes  $\phi_0$  con  $\phi = 0.25$ ;  $H_0/L_0 = 0.4$ ;  $H_1/L_1 = 0.4$  y  $H_2 = 0.1$ .

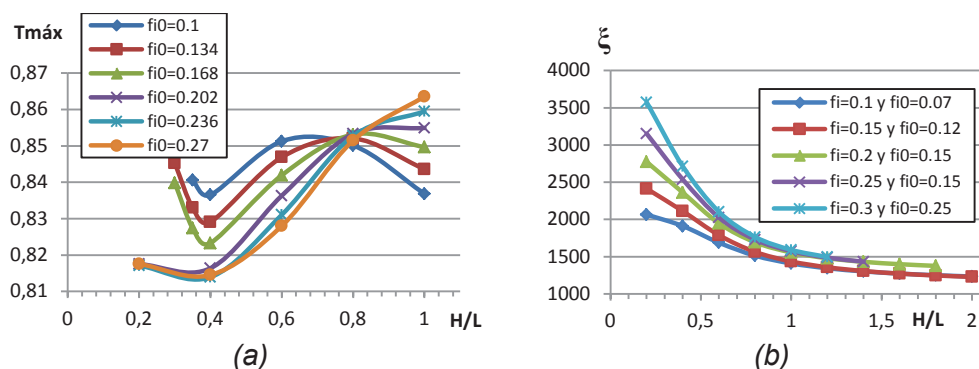


Figura 6: (a) Curvas de  $\tilde{T}_{máx}$  en función de  $\tilde{H}/\tilde{L}$  para diferentes  $\phi_0$  con  $\phi = 0.3$ ;  $\tilde{H}_0/\tilde{L}_0=0.4$ ;  $\tilde{H}_1/\tilde{L}_1 = \tilde{H}_0/\tilde{L}_0=0.4$  y  $\tilde{H}_2=0.1$ .  
 (b) Curvas de eficiencia de evacuación de calor ( $\xi$ ) vs.  $\tilde{H}/\tilde{L}$  para diferentes  $\phi$  y su valor óptimo de  $\phi_0$ , con  $\tilde{H}_0/\tilde{L}_0=0.4$ ;  $\tilde{H}_1/\tilde{L}_1 = 0.4$  y  $\tilde{H}_2=0.1$ .

Tabla 3: Diseño Constructal para diferentes relaciones de material ( $\phi$ )

$\phi$	$[\phi_0]_{ópt}$	$[\tilde{H}/\tilde{L}]_{ópt}$	$[\frac{\tilde{H}_0}{\tilde{L}_0}]_{ópt}$	$[\frac{\tilde{H}_1}{\tilde{L}_1}]_{ópt}$	$[\tilde{H}_2]_{ópt}$	$\tilde{T}_{máx}$	$q$	$\xi$	$[A_0/A_1]_{\phi}$	Figura 7
0.1	0.07	0.56	0.4	0.4	0.1	0.871	1508	1730	4.7	(a)
0.15	0.12	0.58	0.4	0.4	0.1	0.858	1559	1817	8.0	(b)
0.2	0.15	0.44	0.4	0.4	0.1	0.843	1912	2269	6.0	(c)
0.25	0.2	0.45	0.4	0.4	0.1	0.829	1980	2389	8.0	(d)
0.3	0.25	0.44	0.4	0.4	0.1	0.817	2095	2565	10.0	(e)

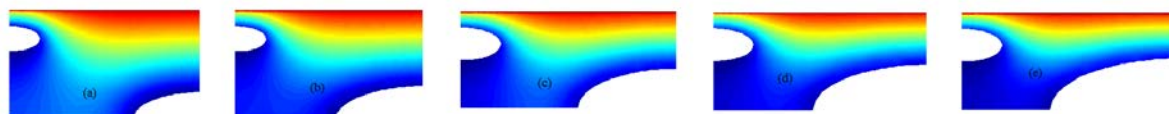


Figura 7: Perfil de temperaturas de cada diseño Constructal referido a la tabla 3

## CONCLUSIONES

Las conclusiones generales del trabajo, establecen que Valores de  $\tilde{H}_2$ ;  $\frac{\tilde{H}_0}{\tilde{L}_0}$  y  $\frac{\tilde{H}_1}{\tilde{L}_1}$  respecto de la  $\tilde{T}_{máx}$  y de  $\xi$ , toman valores óptimos en los extremos inferiores de los rangos de variación.

Mientras que arrojan diseños diferentes respecto del tamaño relativo de los conductos( $A_0/A_1$ ) y de la relación de aspecto del dominio  $\tilde{H}/\tilde{L}$ . Por lo tanto a la hora de diseñar los conductos de refrigeración se deberá asegurar que  $\tilde{T}_{máx}$  se encuentre por debajo de la temperatura de ablandamiento del material, con la máxima eficiencia de evacuación de calor, pudiendo recurrir, a técnicas adicionales de refrigeración.

Siendo el objetivo principal minimizar los puntos calientes, es posible diseñar múltiples canales elípticos internos de refrigeración de forma de minimizar la máxima temperatura sobre el metal del álabe, generando una geometría que facilita la evacuación de calor hacia los conductos, tal como predice la teoría Constructal.

## REFERENCIAS

[1] J. Han, S. Dutta, S. Ekkad, "Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology". 2 editions (November 27, 2012) ISBN-13:978-1439855683. ,Taylor & Francis, New York.  
 [2] Bejan- Lorente , "Design with Constructal Theory", Jhon Wiley and sons, 2008.  
 [3] Rocha- Bejan- Lorente, "Constructal Law and the Unifying Principle of design". Springer, 2013.



[4] Huijun Feng, Lingen Chen, Zihui Xie, Fengrui Sun, “Constructal design for gas-turbine blade based on minimization of maximum thermal resistance”, *Applied Thermal Engineering* 90 (2015) 792e797.

[6] Je-Chin Han, “Recent Studies in Turbine Blade Cooling”, *International Journal of Rotating Machinery*, 10(6): 443–457, 2004, Taylor & Francis Inc.

[7] Je-Chin Han, Lesley M. Wright, “Enhanced Internal Cooling of Turbine Blades and Vanes”, Turbine Heat Transfer Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University College Station, Texas 77843-3123, USA.

## PROYECTO DE EXTENSIÓN: MEJORA EN LA CADENA PRODUCTIVA EN EL ÁMBITO LABORAL DE LA COOPERATIVA DE TRABAJO SAFRA LTDA.

Ing. Arocas Sergio Martin<sup>1</sup>, Ing. Hollman Yanina<sup>2</sup>, Ing. Bulacios Esteban<sup>3</sup>

1-UIDET IAME Facultad de Ingeniería, Calle 1 y 47, La Plata, Argentina.  
martin.arocas@ing.unlp.edu.ar

2-Docente Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Calle 1 y 47, La Plata, Argentina.  
yanina.hollman@ing.unlp.edu.ar

3-UIDET IAME Facultad de Ingeniería, Calle 1 y 47, La Plata, Argentina.  
estebanbulacios@ing.unlp.edu.ar

### INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se sustenta en la base de que el sistema productivo del sector cooperativista está conformado por microempresas, pequeñas empresas y fábricas recuperadas de trabajo. Éstas son fundamentales para el desarrollo local de la región, dado que son generadores de mano de obra y ocupan un alto porcentaje de la población económica activa.

Estas empresas enfrentan una serie de inconvenientes técnicos-logísticos que muchas veces le impiden alcanzar los niveles de eficiencia productiva y competitividad que requiere el mercado en el que se insertan para poder sostenerse y crecer dentro del mismo.

La Cooperativa Safra Ltda es miembro de la Unión Productiva de Empresas Autogestionada (UPEA) y se dedica a la producción de caldos deshidratados, sopas instantáneas light y caldos en cubos que comercializa bajo la marca Caldiet, productos que se distinguen por estar fortificados con vitaminas B1, B2, B6, B12, Ácido fólico, vitamina A, D, E; se encuentra radicada en Berazategui y desde el año 2009 es una fábrica gestionada por sus trabajadores.

Tras el fallecimiento del dueño de la empresa y la consiguiente quiebra, los trabajadores notan el vaciamiento, la desinversión paulatina de empresa y la falta de definición por parte de los herederos en retomar la iniciativa. A partir de ese momento, son los trabajadores quienes se encargan de la misma haciendo guardias para evitar el desabastecimiento de la fábrica. La falta de pago hizo que muchos trabajadores dejaran su actividad en la empresa, pero otros decidieron quedarse y formar una cooperativa. Gracias al trabajo incesante de estos, la fábrica logró recuperar sus funciones y mantenerse en producción desde el 2009.

En el 2014 la cooperativa decidió renovar los diseños de sus envases por los que la empresa fue galardonada con el sello "Buen diseño argentino" edición 2015, otorgado por el plan nacional de diseños del Ministerio de Industria de la Nación. Hoy en día la cooperativa cuenta con 20 trabajadores o socios, siendo Graciela Avalos la presidente de la cooperativa de trabajo. En la actualidad la cooperativa busca seguir enfocándose en la mejora continua de los procesos y la inversión en nuevos productos, como son los caldos con agregados de semillas como Chía, que cuentan con propiedades nutritivas y saludables para el organismo.

El objetivo general del proyecto busca fortalecer los vínculos entre los trabajadores que componen la cooperativa a través de acciones transformadoras de las prácticas laborales cotidianas, promoviendo la seguridad e higiene en la tarea desempeñada, los modos de organización de la planta, el manejo seguro, la calidad y productividad de la planta con la mayor eficiencia.

Los objetivos específicos son:

1. Identificar los rasgos característicos en cuanto a deficiencias en Higiene y Seguridad.

2. Identificar y describir estrategias individuales o colectivas utilizadas para afrontar los factores de riesgo derivados del relevamiento en planta.
3. Evaluar el ambiente laboral de la planta de producción.

## PARTE EXPERIMENTAL

Las actividades iniciaron con una entrevista de trabajo junto a los directivos de la cooperativa donde se definieron los objetivos y alcance desde el punto de vista técnico del proyecto y se realizó una visita de reconocimiento de las instalaciones y máquinas de la planta de producción con el fin de recabar información para la formulación de un plan de relevamiento donde se describen diferentes aspectos a evaluar del ambiente laboral, tomando como base las condiciones específicas del Decreto 351/79.

En el plan de relevamiento se consideran los aspectos más influyentes de los riesgos laborales dentro del ambiente de trabajo. Los aspectos abordados que forman parte del plan son: Layout, Calidad, Ergonomía, Protección contra incendios, Factores de riesgo acústico, Riesgo eléctrico e Iluminación y Color.

### a) *Layout*

Los factores a analizar en las dependencias de la planta de producción de la cooperativa son: congestión y movimiento de materiales, orden, cuidado y tiempos de demora en los despachos, daños a materiales almacenados, condiciones de iluminación, ventilación y ruido.

### b) *Calidad*

En cuanto a la calidad que debe presentar el producto, la norma ISO 9001 establece que durante la planificación para la elaboración del producto, la organización debe determinar, cuando sea apropiado, lo siguiente:

- Los objetivos de la calidad y los requisitos para el producto.
- Establecer procesos y procedimientos documentados.
- Las actividades requeridas de verificación, validación, seguimiento, medición, inspección y ensayo/prueba específicas para el producto así como los criterios para la aceptación del mismo.
- Los registros que sean necesarios para proporcionar evidencia de que los procesos de realización y el producto resultante cumplen los requisitos.

### c) *Ergonomía*

Ergonomía es el término aplicado al campo de los estudios y diseños de la interface entre el hombre y la máquina para prevenir la enfermedad y el daño mejorando la realización del trabajo. Se analiza la ergonomía bajo el concepto de Nivel de Actividad Manual ya que tiene por finalidad describir el valor límite umbral que se puede cargar en la mano, en la muñeca y en el antebrazo y la definición de las condiciones para el levantamiento manual de cargas en la cooperativa.

### d) *Protección contra incendios*

Si bien no está directamente relacionada con la producción, es muy importante ya que representa la protección de la salud y la vida de las personas y el cuidado de los bienes de la cooperativa.

Se analiza la protección contra incendios considerando los tres campos siguientes:

- Prevención, neutralizando las causas físico-químicas y las causas humanas.
- Protección efectuada sobre personas (escape) y bienes.
- Extinción o supresión conociendo las clases de fuegos, los agentes extintores y las técnicas básicas de extinción.

*e) Factores de riesgo acústico*

Se define el riesgo acústico como la probabilidad de ocurrencia de un efecto perjudicial motivado por la exposición al ruido, tanto para la audición como para la salud en general.

En éste caso es imperativa la implementación de un Programa de Conservación Auditiva que incluya:

- Métodos de determinación de exposición.
- Controles técnicos y administrativos del ruido.
- Formación y motivación respecto a la conservación auditiva.
- Elementos de protección auditiva.
- Audiometrías.

*f) Riesgo eléctrico*

El riesgo eléctrico se produce en toda tarea que implique actuaciones sobre instalaciones eléctricas de baja, media y alta tensión, utilización, manipulación y reparación del equipo eléctrico de las máquinas, así como la utilización de aparatos eléctricos en entornos para los cuales no han sido diseñados.

Para satisfacer los requerimientos de seguridad y protección contra riesgos eléctricos, se deben considerar al menos los siguientes puntos:

- Protección de la línea de alimentación Se verifica que tipo de protección.
- Nivel de tensión.
- Tablero principal Conocer la ubicación, accesibilidad y señalización.
- Protecciones y distribución de los circuitos dentro del tablero principal.
- Tableros secundarios. Ubicación, accesibilidad y señalización. Protecciones. Distribución de los tableros secundarios.
- Circuitos de fuerza motriz, circuito de iluminación y montaje de conductores.
- Puesta a tierra Determinar la sección del conductor de protección.

*g) Iluminación y Color*

Desde el punto de vista de la seguridad en el trabajo, la capacidad y el confort visual son muy importantes, ya que muchos accidentes se deben a deficiencias en la iluminación o a errores cometidos por el trabajador, a quien le resulta difícil identificar objetos o los riesgos asociados con la maquinaria, los movimientos o los recipientes peligrosos.

El análisis de la iluminación en el lugar de trabajo se lleva adelante no sólo con criterios cuantitativos, sino cualitativos, por esta razón, debe determinar el cumplimiento en cuanto a uniformidad e intensidad de la iluminación del ambiente de trabajo.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

A partir del análisis de las condiciones de trabajo de la cooperativa Safra Ltda se busca identificar las posibles mejoras en la cadena de producción y las tareas inherentes al proceso productivo tomando como fuente de información los datos del relevamiento sobre riesgo eléctrico, protección contra incendios, calidad, ergonomía, layout, ruido e iluminación y color de la planta de producción, siendo estos los que permiten definir los aspectos a mejorar en cada área en particular y para la cadena de producción en su conjunto.

De los datos obtenidos del relevamiento en planta se presentan propuestas y conclusiones particulares por tema abordado.

*a) Layout*

La cooperativa SAFRA Ltda., en forma general, mantiene la distribución en planta definida originalmente. En el momento en que fue realizado el relevamiento se encontraba funcionando en 40% aproximadamente de la capacidad instalada ya que el diseño permite que operen 40 trabajadores y actualmente funciona con 15 operarios.

El espacio ocioso actual otorga una ventaja sustantiva para desarrollar las actividades de forma segura para sus trabajadores y al mismo tiempo es posible minimizar problemas de

congestión en pasillos y en contrapartida exige mayores tiempos de manipulación y traslado de materiales, lo que se traduce en tiempos improductivos.

Del análisis de layout de planta, se llega a las siguientes conclusiones particulares:

- I. Es necesaria una inversión para el mantenimiento continuo de la maquinaria. En caso de que todas las máquinas de la planta funcionaran correctamente no serían necesarias modificaciones en la distribución en planta.
- II. Mejora en las condiciones generales del establecimiento, humedad y grasa en las paredes. Se aconseja colocar una campana extractora de vapor en la sala de cocinado y extractos y reponer los azulejos en el resto de la planta.
- III. Considerando la situación actual, se deben reubicar las máquinas que funcionan correctamente acercándolas a la salida de la mezcladora para minimizar las distancias de movimiento de mezcla.
- IV. No dejar material interrumpiendo los pasillos como es el caso de los carros con bandejas. Se recomienda colocarlos en lugares cercanos a las líneas de producción.
- V. Reacondicionar la señalización de los pasos en el piso y marcar las salidas de emergencia.

#### *b) Calidad*

El control de calidad que se lleva a cabo en cooperativa SAFRA está orientado a verificar el peso de todos los productos en la línea de producción (caldos deshidratados, sopa instantánea light, frascos de caldo en polvo) y, en particular, a los caldos deshidratados se mide también la humedad. Además se realiza un control visual por los operarios de cada tarea, descartando aquellos productos cuyo envase esté defectuoso.

Del análisis de calidad, se llega a las siguientes conclusiones particulares:

- I. Implementar registros que proporcionen información sobre productos defectuosos en cada etapa, y así tener un control sobre lo que se desecha. Además los registros aportarán información estadística a la cooperativa sobre sus niveles de producción, y así podrán cumplir con la demanda correctamente.
- II. Reparación y ajuste adecuado de las máquinas envasadoras. Si bien se recupera el producto (cubos o sopas instantáneas) se tienen pérdidas de tiempo y papel laminado para envasado.
- III. También se reducirían los costos del papel laminado que se desechan y horas de mano de obra.
- IV. Poner en funcionamiento el laboratorio que se encuentra en planta, ya que esto permitiría realizar los análisis correspondientes a los productos y no se incurriría en costos de enviarlos a otro laboratorio. Además se minimiza el tiempo de laboratorio.

#### *c) Ergonomía*

Determinación del Nivel de Actividad Manual (NAM) y fuerza pico de mano: se observaron las actividades realizadas por los operarios, las tareas que deben realizar con sus manos y el esfuerzo que significaba cada una de ellas. El nivel de actividad manual para cada actividad arroja como resultados que se realizan “Movimientos/esfuerzos lentos, fijos, pausas breves y frecuentes” o “Movimientos/esfuerzos lentos, fijos, pausas insuficientes”. En cambio la fuerza pico de la mano para cada actividad es varía según la actividad.

Las actividades son: 1) Revolver verduras, 2) Acomodar papel de aluminio, 3) Poner caldo en tolva, 4) Sacar el caldo depositado de la máquina, 5) Deslizar cubos en las líneas de producción, 6) Armado de caja, 7) Colocar sticker en caja, 8) Colocar fecha de vencimiento, 9) Meter cubos en botella, 10) Cerrar botella, 11) Cerrar caja, 12) Colocar caldos en cajitas, 13) Cerrar las cajitas y 14) Colocar cajitas en cajas

Una vez establecidas se procede a determinar si la actividad manual es acorde o excesiva ingresando en la figura 1 con el NAM como abscisa y la FPM como ordenada. Si es acorde deberá estar por debajo de la línea continua, que representa el valor límite umbral, se recomienda estar por debajo de la línea punteada.



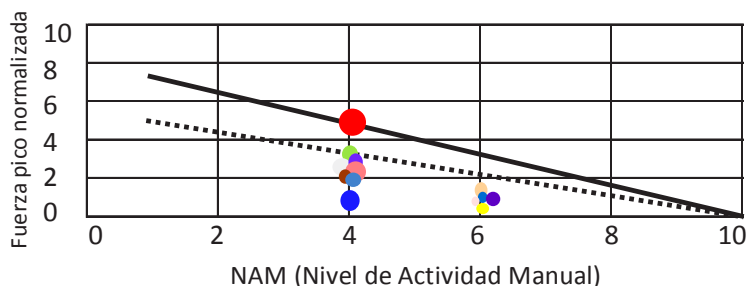


Figura 1. Control de Actividad Manual

La actividad 1 (punto color rojo) que consiste en revolver la premezcla de verduras, en la que requiere mayor esfuerzo y se encuentra en el umbral máximo.

Del análisis de ergonomía, se llega a las siguientes conclusiones particulares:

- I. En cuanto a la actividad manual, para que deje de estar sobre el valor límite umbral se recomienda que esta actividad de revolver la premezcla de verduras sea efectuada por dos personas. De esta manera los movimientos podrán ser más lentos y la carga a revolver por cada operario baja.

En cuanto al levantamiento manual de cargas:

- II. Para la descarga de bolsas de materia prima de los camiones y la carga de productos terminados, se recomienda el uso de un autoelevador para con el fin de reducir el esfuerzo físico de los trabajadores.
- III. Para la colocación de las bolsas de verdura en la premezcladora, se recomienda poner en funcionamiento una cinta transportadora que se encuentra fuera de servicio en la cooperativa la que permitirá simplificar las tareas de movimiento que implica levantar cada bolsa de verdura de 15 kg, llevarla hasta la alimentación de la premezcladora que se encuentra por encima de los hombros del trabajador, y previamente subiendo una escalera de 6 escalones con la bolsa.

#### d) Protección contra incendios

La situación actual con respecto a la protección contra incendios se resume en que, no se observan vías de escape adecuadas, no hay avisos visibles con números y direcciones de emergencia. Los extintores no están distribuidos uniformemente por la planta de producción. Algunos se encuentran mal ubicados y con obstáculos mediante, de manera que no quedan accesibles al personal. Esto dificulta su localización y utilización en caso de emergencia.

En el depósito de envases y packaging los materiales combustibles no están separados de los no combustibles.

Los extintores y salidas de emergencia no se encuentran señalizados, además varios extintores son demasiado grandes y pesados, lo cual dificulta su utilización, considerando también que no posee alarma contra incendio y no existen planes de prevención ni de emergencia.

Del análisis de protección contra incendios, se llega a las siguientes conclusiones particulares:

- I. Colocar avisos visibles con números y direcciones de emergencia.
- II. Separar los materiales combustibles de los no combustibles en el depósito de envases y packaging.
- III. Distribuir los extintores asegurando su accesibilidad.
- IV. Señalizar extintores, rutas de evacuación y salidas de emergencia.
- V. Dotar aquellos extintores grandes y pesados con un carrito para transporte.
- VI. Formular un Plan de Prevención y Emergencia
- VII. Capacitar al personal sobre cómo actuar ante un incendio utilizando los equipos disponibles. Se aconseja realizar un simulacro de incendio por año.
- VIII. Adecuar las salidas de emergencia actuales y /o construir nuevas.

IX. Instalar alarma contra incendio y sistema de detección automáticos de incendios.

e) *Factores de riesgo acústico*

Analizados todos los factores de riesgo acústico dentro de la cooperativa se puede determinar que no existen mayores riesgos, estos valores relevados en plata se muestran en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1. Relevamiento de Riesgo acústico.

MEDICION DE RUIDO EN EL AMBIENTE LABORAL						
Razon Social	Cooperativa de Trabajo Safra Limitada				CUIT:	30-71119726-1
Dirección	Calle 109 N°: 2243	Localidad	Berazategui	CP	1884	Provincia: Buenos Aires
Datos de la medición						
Punto de Muestreo	Hora	Sector	Sección / Puesto /Puesto Tipo	Equipo /Maquina/ Motor	Valor Medido [dBA]	Observaciones
1	10:15	Mezclas	Materia Prima	Mezcladora	90	Utilizan proteccion audtiva
2	10:21	Produccion	Maquinistasx2	Cubeteadora simple	83,5	No utilizan proteccion auditiva
3	10:24	Produccion	Maquinistasx2	Cubeteadora doble	85	No utilizan proteccion auditiva
4	10:36	Produccion	Maquinista	Linea Tober	75	No utilizan proteccion auditiva
5	10:40	Embalaje	Empacador	Herramienta manual	82	Muy cercano a maquinas de produccion
6	10:45	Laboratorio	Calidad	Computadoras	60	Sin riesgo
7	11:00	caldera	-	Caldera	72	No hay empleados
8	11:10	Materia Prima	-	Camara Frigorifica	60	No hay empleados
9	11:30	Produccion	maquinistax2	empaquetadora	75	Sin riesgo
10	11:50	Coccion	Cocinero	caldera/Hornos	72	Sin riesgo
11	12:07	Taller	Mecanico	Torno	76.6	Sin riesgo

En los sectores donde el ruido es elevado se utilizan elementos de protección auditiva y se encuentra señalizada la obligatoriedad de su uso.

Del análisis de *Factores de riesgo acústico*, se llega a las siguientes conclusiones particulares:

- I. Se recomienda realizar mediciones periódicas de nivel de ruido y audiometrías a los operarios que se encuentran periódicamente expuestos a estos.

f) *Riesgo eléctrico*

En la instalación eléctrica se encontró que los dispositivos de señalización contra contactos indirectos no se funcionan, se encontraron cables sin canalizar, tomacorrientes empalmados a la instalación eléctrica, cables a la vista energizados, utilización de alargues eléctricos, llave termomagnética sueltas, cableado aéreo sobre tensores colgantes y tomacorriente protegidos con cinta adhesiva transparente

Del análisis de riesgo eléctrico, se llega a las siguientes conclusiones particulares:

- I. Se requiere implementar un plan de adecuación de los dispositivos de protección eléctrica.
- II. Es necesario realizar mantenimiento correctivo de la instalación eléctrica para minimizar los riesgos eléctricos.
- III. Fijar los dispositivos de protección sueltos y evitar el uso de adaptadores.
- IV. Proveer al personal de planta con protección contra riesgos eléctricos como zapatos de seguridad.
- V. Anular todos los cableados sin uso, especialmente los que se encuentran energizados.
- VI. Capacitación al personal de mantenimiento en seguridad de instalaciones eléctricas.

g) *Iluminación*

En el relevamiento de iluminación se determinó el cumplimiento de uniformidad e intensidad de iluminación en todos los sectores de la planta de producción y se resumen en la tabla 2. Se consideran los valores de iluminación de referencia definidos en la ley de seguridad e higiene.

Tabla 2. Condición de uniformidad e intensidad en las áreas de producción.

Sector	Uniformidad	Intensidad
Envasado de cubitos	Cumple	No Cumple
Sala de mezclado	Cumple	No Cumple
Elaboración de pollo y extractos	No Cumple	Cumple
Oficina 13	Cumple	No Cumple
Taller	No Cumple	Cumple
Depósito de cajas	No Cumple	No Cumple
Secado caldo en polvo	Cumple	Cumple
Pasillo 1	No Cumple	No Cumple
Molienda	No Cumple	No Cumple
Envasado de caldo en polvo	Cumple	No Cumple
Imprenta	Cumple	No Cumple
Oficina	Cumple	No Cumple
Depósito de materia prima	Cumple	No Cumple
Pasillo cámara frigorífica	Cumple	No Cumple
Cámara frigorífica	Cumple	No Cumple
Depósito de producto terminado	Cumple	No Cumple

Del análisis de *iluminación*, se llega a las siguientes conclusiones particulares:

De todos los sectores relevados cinco de ellos no cumplen con el criterio de uniformidad en la iluminación, mientras que once sectores no cumplen con la intensidad de iluminación y se observa la falta de luces de emergencia.

En base a la problemática se plantean las siguientes recomendaciones:

- I. Se recomienda el cambio gradual hacia la utilización de iluminación LED
- II. Para los sectores más amplios y de mayor altura se recomienda el uso de campanas industriales Led High Bay de 50 W marca: Philips con campana a 60°.

## CONCLUSIONES

Luego de las visitas a la planta, relevamiento general y posterior análisis se pudo concluir que el principal problema que tiene la cooperativa Safra es el mantenimiento de las máquinas y las instalaciones de la planta de producción. De esta manera es posible mejorar la producción y la calidad de los productos, al disminuir las fallas en los equipos y la posibilidad de contaminación biológica. El mantenimiento debe estar apuntado a la instalación eléctrica, layout, iluminaria y protección contra incendios. A su vez, con la puesta en funcionamiento de la cinta transportadora se reducirían los tiempos del proceso de producción y el riesgo ergonómico de los trabajadores.

De esta manera, la cooperativa de trabajo Safra debe generar un plan de mantenimiento preventivo, que anticiparía las posibles fallas o desperfectos en los equipos y que permita disminuir las salidas de servicio de una o varias líneas de producción; en lugar de aplicar mantenimiento correctivo como realizan en la actualidad. El cambio de mantenimiento correctivo a preventivo genera también la posibilidad de reducir los costos totales de producción, obteniendo mayor rentabilidad aunque se necesita de una gran inversión inicial.

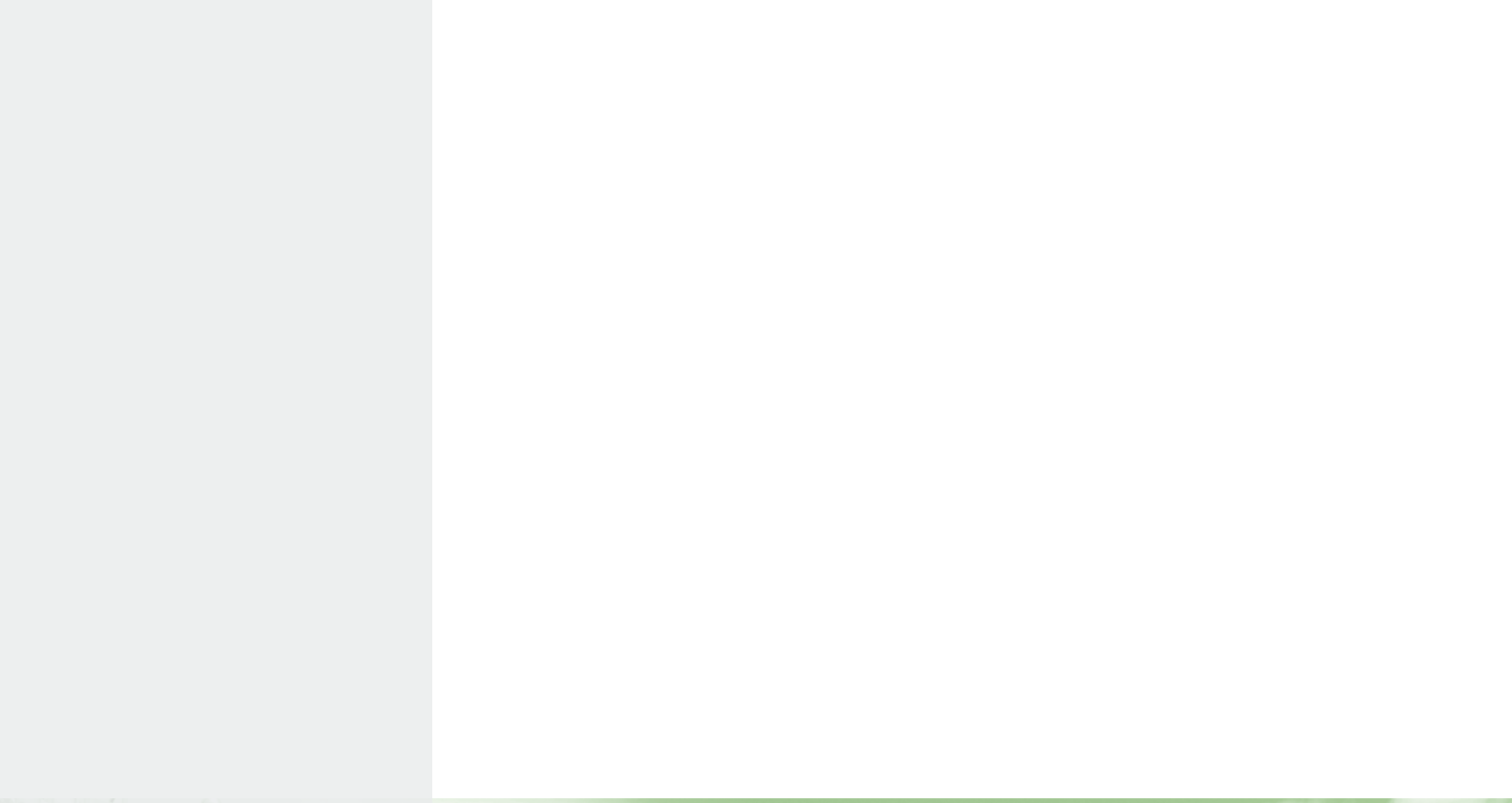
Con la realización de este proyecto se aprobaron las Practicas Profesionales Supervisadas de cuatro alumnos de la carrera ingeniería industrial en el marco de la Ordenanza 082/03 y la Resolución 0569/14 de la facultad de Ingeniería.

## BIBLIOGRAFÍA.

- Oficina Internacional del Trabajo (OIT), Introducción al estudio del trabajo, Editorial Limusa, México, 2008.
- Ley 19587 de Higiene y Seguridad en el Trabajo decreto 351

- ASFAHL, Ray C. y RIESKE, David W, Seguridad Industrial y Administración de la Salud. Pearson Education. México, 2010.
- Manual de Seguridad contra Incendios de Demsa 3ª Edición, 2015.





# PRODUCCIÓN



## **GESTIÓN DEL COSTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN CLUBES DE BARRIO: EL CASO DEL CLUB UNIVERSAL**

Natalia Cibeira, Manuela Pendón, Eduardo Williams, Romina Couselo, Gabriel Crespi, Marcelo Tittone

Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia de Formulación y Evaluación de Proyectos - UIDET FyEP, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata. Calle 1 y 47 - La Plata (B1900TAG) - Provincia de Buenos Aires – Argentina.

[natalia.cibeira@ing.unlp.edu.ar](mailto:natalia.cibeira@ing.unlp.edu.ar) – [fyeproyectos@ing.unlp.edu.ar](mailto:fyeproyectos@ing.unlp.edu.ar)

El consumo de energía, como una variable más dentro de la gestión de una institución, adquiere relevancia cuando de esa gestión se pueden obtener ventajas que se traducen directamente en ahorros reflejados en la cuenta de resultados. Se han de contemplar dos aspectos fundamentales que permiten optimizar el costo de la energía y, por lo tanto, maximizar el beneficio: optimización tarifaria y optimización de instalaciones.

La distribución del consumo energético de un club de barrio con instalaciones deportivas, depende de varios factores: del tipo de instalación, de su situación, categoría, servicios que ofrece, etc.

Por su particular finalidad, una instalación deportiva es un área de recreo creada para desarrollar diferentes actividades con requerimientos físicos diferentes. La energía, en sus distintas formas, es utilizada en muchas de las aplicaciones para contribuir a crear un ambiente confortable.

Es común, en este tipo de instituciones, que los costos de energía sean en su totalidad o en parte subsidiados por el Estado por lo que la adecuada gestión de los mismos redundaría en una eficiente utilización de los recursos públicos. El costo de la electricidad producto de las recientes actualizaciones tarifarias gana participación en la estructura de costos y se torna una variable atractiva de gestión.

En el presente se comparten los resultados y conclusiones obtenidos en el desarrollo del proyecto de extensión realizado en el Club Universal de la ciudad de La Plata.

### **INTRODUCCIÓN**

En el país existe un gran número de clubes de barrio, cuyo uso y disfrute implican una demanda continua de energía. Dicho gasto debe realizarse con criterios de racionalidad, tanto por parte de los usuarios como por los responsables de mantenimiento y conservación de las instituciones.

Para una correcta gestión energética de las instalaciones deportivas es necesario conocer cuáles son las variables clave a la hora de lograr la optimización energética. Esto permitirá un mejor aprovechamiento de los recursos y un ahorro tanto en el consumo como en el dimensionamiento de las instalaciones.

Las aplicaciones que más consumo de energía concentran en los clubes son: agua caliente sanitaria, climatización e iluminación. El presente trabajo se limita a estudiar los costos de energía eléctrica para sus diferentes usos.

Se han de contemplar dos aspectos fundamentales que permiten optimizar el costo de la energía y, por lo tanto, maximizar el beneficio: optimización tarifaria y optimización de instalaciones.

### **DESARROLLO**

Para poder realizar un análisis de la gestión del costo de energía eléctrica en los clubes de barrio se definieron las siguientes etapas:

- Armado del equipo energético
- Diagnóstico energético del edificio
- Auditoría Energética

- Información a los usuarios: instancia de comunicación y retroalimentación
- Búsqueda de financiamiento para el proyecto
- Ejecución del plan de acción
- Cálculo de los ahorros energéticos obtenidos
- Difusión de los resultados

### **Armado del equipo energético**

El equipo de trabajo debe estar conformado por personal del club y de la Facultad de Ingeniería de la UNLP.

Es muy importante lograr un compromiso por parte de la institución para poder obtener logros concretos y que éstos se mantengan en el tiempo.

### **Diagnóstico energético del edificio**

Para poder tomar medidas en cuanto a la eficiencia energética, el primer paso debe ser realizar un diagnóstico de la situación actual.

Se analizan dos aspectos fundamentales: la tarifa y las instalaciones.

Con respecto a la tarifa, se debe revisar el contrato con la compañía distribuidora, si el encuadre tarifario es correcto y las condiciones del contrato son las óptimas según el perfil de carga del club.

En cuanto a las instalaciones se debe realizar un estudio del consumo. La distribución del consumo energético demandada por una instalación deportiva, depende de varios factores: del tipo de instalación, de su situación, categoría, servicios que ofrece, etc. Generalmente las instalaciones deportivas consumen energía eléctrica para alumbrado, bombeo de agua, aire acondicionado, maquinaria eléctrica, etc. También se están implantando, cada vez con mayor frecuencia, las bombas de calor eléctricas, que permiten el suministro de calefacción durante los meses fríos.

El consumo de energía eléctrica, es generalmente la principal partida del consumo energético en una instalación deportiva. Este consumo de energía eléctrica es variable a lo largo del año, presentando generalmente una demanda ligada al grado de ocupación e influenciada también por la demanda de aire acondicionado.

Por su particular finalidad, una instalación deportiva es un área de recreo creada para desarrollar diferentes actividades con requerimientos físicos diferentes. La energía, en sus distintas formas, es utilizada en muchas de las aplicaciones para contribuir a crear un ambiente confortable.

Por otra parte, no siempre un mayor consumo energético equivale a un mayor confort o a un mejor servicio. Se conseguirá un grado de eficiencia óptima cuando el confort de los distintos ambientes y el consumo estén en la proporción adecuada.

En esta etapa se pretenderá contar con información primaria de la estructura de consumo de la institución. Determinando el consumo por local del establecimiento, su distribución horaria y los usos para los cuales se consume la energía.

### **Auditoría Energética**

Una vez realizado el diagnóstico de la situación actual, se pasa a la etapa de detalle. Se realiza un estudio técnico y económico de las posibles mejoras.

Algunas potenciales mejoras que se podrían efectuar para optimizar el consumo de las instalaciones son:

- Adición o reducción de la cantidad de lámparas según la normativa vigente para cada espacio.
- Iluminación de zonas auxiliares: reducción del consumo y de la potencia de encendido mediante la incorporación de temporizadores/detectores de presencia.
- Iluminación en general: cambio de las luminarias y de las lámparas por otras más eficientes en función de la distancia, uso del espacio, tipo de lámparas, etc.
- Climatización: cambio de equipos por otros de mayor eficiencia.
- Adición de ventanas que permitan el ingreso de luz durante el día.

Por otra parte debe analizarse si la iluminación actual cumple con la reglamentación vigente para espacios deportivos y demás dependencias de los clubes.

Al diseñar la iluminación de un campo deportivo, se deben tener en cuenta los requisitos y el confort para los cuatro grupos de usuarios: jugadores, árbitros, espectadores y medios de comunicación (televisión y fotógrafos).

Los jugadores y árbitros deben poder observar claramente todo lo que sucede en el área de juego para poder realizar la mejor performance posible. La iluminación artificial en las canchas cubiertas debe ser uniforme y de manera que no dificulte la visión

Los espectadores deben poder seguir la performance de los jugadores y la acción del juego realizando el menor esfuerzo. El entorno de visión debe ser agradable, lo que significa que no sólo se debe ver el área de juego, sino también los alrededores inmediatos. La iluminación debe ayudar al espectador a ingresar y salir de él en forma segura.

Se realizará un documento donde se expliciten las posibles mejoras en cada área del club, con sus respectivos costos y determinación de los ahorros futuros.

### ***Información a los usuarios***

Concluida la auditoría energética se realizará una reunión con las autoridades del club con el objeto de informarles los resultados del proyecto analizado y buscando obtener una retroalimentación que permita, de ser necesario, realizar ajustes al proyecto.

### ***Búsqueda de financiamiento para el proyecto***

En caso de aprobación del proyecto por parte de las autoridades de la institución y de necesitar financiar el proyecto externamente se colaborará con el armado del plan de negocio y presentación de la documentación que requieran.

### ***Ejecución del plan de acción***

La institución es la responsable de ejecutar el proyecto según lo acordado.

### ***Calculo de los ahorros energéticos obtenidos***

Una vez ejecutado el proyecto, se evaluarán los resultados obtenidos comparándolos con los objetivos previamente definidos. Se realizará un análisis de desvíos y de ser necesario se tomarán nuevas medidas.

### ***Difusión de los resultados***

Finalmente se realizará una difusión de los resultados a la comunidad del club y de la Facultad de Ingeniería, buscando poder replicar el caso en otros clubes de barrio.

## **RESULTADOS**

El Club Universal de La Plata surgió en la primavera de 1941, donde un grupo de jóvenes adolescentes resolvieron fundar un club de fútbol para toda la barriada de 25 y 58, a fin de canalizar sus prácticas deportivas y sentirse representados por una institución.

Desde entonces el club ha tenido un continuo crecimiento, estando hoy su sede en calle 25 entre 57 y 58. En él se realizan distintas actividades deportivas como básquet, patín, pelota paleta, tae-kwondo y vóley. Además se dictan clases de zumba y en su interior funciona un gimnasio y la biblioteca popular Florentino Ameghino que presta sus servicios de manera gratuita a más de 400 socios lectores, con más de 8.500 volúmenes, servicio de referencia, préstamos a domicilio, consulta en sala y extensión cultural entre otras actividades.

El horario de funcionamiento del club es de 8 a 22 hs todos los días de la semana. A la fecha el proyecto de extensión desarrollado en el Club Universal se encuentra en la instancia de diagnóstico energético del edificio.

El equipo de trabajo está conformado por personal de la institución y de la Facultad de Ingeniería de la UNLP. El personal de la facultad incluye a docentes de la UIDET Formulación y Evaluación de Proyectos y a ocho alumnos de la carrera de Ingeniería Industrial de cuarto y quinto año.

Para poder realizar el diagnóstico energético del edificio, el primer paso fue realizar un relevamiento de las instalaciones. Se solicitaron planos del edificio, se realizó una primera visita para que el personal de la facultad conociera el club y se dividió al equipo de trabajo en dos grupos, uno de procesamiento de datos y otro de relevamiento. En esta etapa se pretende definir cuánto y cuándo se consume energía eléctrica en el Club.

El relevamiento se realizó por número de local del edificio de acuerdo a los planos. De cada local se definió en qué planta se encontraba, las dimensiones (superficie y altura), la cantidad de usuarios, horario de funcionamiento, ventanas (cantidad, dimensiones) material y color del piso, información de la iluminación (tipo de lámparas, luminaria general o localizada, cantidad de luminarias, cantidad de lámparas por luminaria, potencia de cada lámpara y estado de las mismas), artefactos eléctricos, equipamiento informático y equipos de refrigeración, calefacción, estufas y ventilación. De todos se determinó el tipo, marca, modelo, cantidad, potencia, eficiencia y estado.

Actualmente se está realizando la condensación y análisis de los datos obtenidos, para luego pasar a la etapa de auditoría y poder proponer acciones de mejora.

### **CONCLUSIONES**

Los clubes de barrio son entidades muy importantes para la comunidad en la que se encuentran, ya que permiten canalizar no sólo sus actividades deportivas sino también desarrollar actividades culturales y relacionarse con el entorno.

Al funcionar en gran parte con los aportes de los socios, es fundamental que dichas instituciones logren administrar de manera eficiente sus recursos.

La energía eléctrica suele ser un componente importante en su estructura de costos por lo que debe gestionarse adecuadamente.

Los proyectos de extensión como el presente son muy valiosos para la Facultad de Ingeniería ya que le permiten relacionarse con la sociedad y aportar su conocimiento en la formulación de proyectos de mejora. A su vez tienen una gran importancia para los alumnos quienes colaboran en el proyecto e interactúan con docentes y miembros de las entidades. Una vez finalizado, el caso del Club Universal va a poder ser replicado en otras instituciones logrando un mayor beneficio para la comunidad en su conjunto.

### **Bibliografía**

Consejería de Economía y Consumo, o. D. (2008). Guía de eficiencia energética en instalaciones deportivas. Madrid.

Philips. (1997). Manual de Iluminación. Buenos Aires: Philips Argentina SA.

## ENERGÍA RENOVABLE EN ARGENTINA: CAMBIO DE PARADIGMA Y OPORTUNIDADES PARA SU DESARROLLO

Manuela Pendón, Eduardo Williams, Natalia Cibeira, Romina Couselo, Gabriel Crespi, Marcelo Tittone

Unidad de Investigación, Desarrollo, Extensión y Transferencia de Formulación y Evaluación de Proyectos - UIDET FyEP, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata. Calle 1 y 47 - La Plata (B1900TAG) - Provincia de Buenos Aires – Argentina.

[manuela.pendon@ing.unlp.edu.ar](mailto:manuela.pendon@ing.unlp.edu.ar) – [fyeyectos@ing.unlp.edu.ar](mailto:fyeyectos@ing.unlp.edu.ar)

A nivel mundial, las tecnologías de energía renovable para generación de electricidad han tenido un significativo progreso en los últimos años. Algunas tecnologías se han vuelto competitivas en costos con la generación convencional de energía. Sin embargo, en muchos casos, las políticas de apoyo son aun el principal motor de desarrollo. Tales políticas de apoyo son parte integrante de la política energética de un país o región.

Toda política energética ha de ser soportada por tres pilares: Competitividad, Seguridad de abastecimiento y Sostenibilidad Ambiental. Según el Foro Económico Mundial (WEF) la arquitectura energética se encuentra definida como el sistema físico integrado por fuentes de energía, los sectores de transporte y demanda y que son compartidos por el gobierno, la industria y la sociedad. El "triángulo de la energía" sintetiza los objetivos centrales de dicha estructura o política energética: la habilidad de proveer un abastecimiento de energía de forma segura, asequible y sostenible ambientalmente.

Las energías renovables pueden aportar beneficios considerables a la sociedad. Además de la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, los gobiernos han adoptado políticas de energía renovable para cumplir con ciertos objetivos, entre ellos la creación de beneficios locales en materia de medio ambiente y salud; un acceso más fácil a la energía, en particular en las áreas rurales; avances para lograr los objetivos de seguridad energética al diversificar la cartera de tecnologías y recursos energéticos, y un mayor desarrollo social y económico gracias a oportunidades de empleo potenciales y al crecimiento económico. Si las instancias decisorias quieren incrementar el índice de penetración de energías renovables y, al mismo tiempo, cumplir los ambiciosos objetivos de mitigación del cambio climático, los compromisos a largo plazo y una actitud flexible serán fundamentales.

La Ley 27.191 modificó la Ley 26.190 "Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica". La Provincia de Buenos Aires adhirió al Régimen a través de la Ley 14.838. El presente pretende compartir análisis y experiencias que contribuyan en el camino de la energía a partir de fuentes renovables, desde un enfoque de política energética y evaluación de proyectos.

### INTRODUCCIÓN

Diversos autores coinciden en que el desarrollo sostenible puede sintetizarse en 4 objetivos: desarrollo social y económico, acceso a la energía, seguridad energética y mitigación del cambio climático y efectos sobre el medio ambiente y la salud en los escenarios del futuro.

Los cuatros objetivos revisten significativa importancia sin embargo pareciera que el impacto que podría tener el no cumplimiento del cuarto de ellos haría que los otros tres objetivos se situaran en un segundo lugar. Los países y regiones podrán desarrollarse más o menos desde la perspectiva social y económica, podrá haber más o menos dificultades en el acceso a la energía y con mayor o menor seguridad energética, todo ello es de vital importancia pero no se podrá discutir sobre tales puntos si el planeta deja de ser habitable para el ser humano. Por este motivo, se está impulsando de manera significativa la inversión y el despliegue de energías renovables y muchos países se encuentran trabajando en ello



con distintos niveles de penetración. En Argentina la Ley 27.191 modificó la Ley 26.190 “Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica” y durante el año 2016 se llevaron a cabo dos licitaciones que adjudicaron 59 proyectos de energía renovable para conectarse al Sistema Argentino de Interconexión, SADI. Las energías renovables pueden aportar beneficios considerables a la sociedad. Además de la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, los gobiernos han adoptado políticas de energía renovable para cumplir con otros objetivos estratégicos como la seguridad energética, un mayor desarrollo social y económico gracias a oportunidades de empleo potenciales y al crecimiento económico.

### CALENTAMIENTO GLOBAL: LA NECESIDAD DE TOMAR CONCIENCIA

La mitigación del cambio climático plantea un cambio imperativo en la toma de decisiones. Mantener el calentamiento global por debajo de los límites aceptables (2°C) para la supervivencia, requerirá durante las siguientes décadas reducciones sustanciales en las emisiones globales de gases de efecto invernadero [1]. Para reducir las emisiones, las economías deben reducir su intensidad de carbono. Dada la tecnología actual, esto implica un cambio decisivo para alejarse de la energía a partir de combustibles fósiles y el capital físico relacionado. Y el cambio necesario puede realizarse por dos caminos [2]. En un escenario benigno, la transición a una economía con bajas emisiones de carbono ocurre gradualmente: los costos de ajuste son manejables y el reajuste de los activos de carbono probablemente no conlleve riesgo sistémico. Sin embargo, en ausencia de una intervención política adicional o de avances tecnológicos, es probable que el stock de gases de efecto invernadero en la atmósfera siga creciendo a medio plazo.

En un escenario adverso, demorado, la transición a una economía baja en carbono se produce tarde y abruptamente. Una conciencia tardía sobre la importancia de controlar las emisiones podría dar lugar a una aplicación abrupta de restricciones cuantitativas sobre el uso de fuentes de energía intensivas en carbono. Los costos de la transición serán correspondientemente más altos.

Según el Banco Mundial [3], Argentina se encuentra, en términos de consumo energético y participación en las emisiones de efecto invernadero por encima de los países de Latinoamérica y el Caribe.

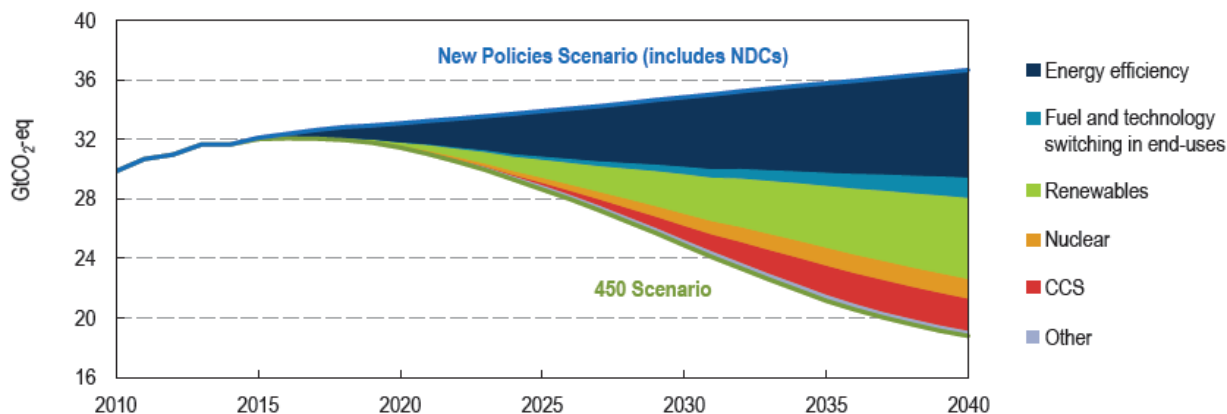
	Latin Country data	America & Caribbean group	High- income group
<b>Energy and emissions</b>			
Energy use per capita (kg oil equivalent)	1,895	1,373	4,656
Energy from biomass products and waste (% of total)	4.2	16.2	4.6
Electric power consumption per capita (kWh)	3,093	2,118	8,508
Electricity generated using fossil fuel (% of total)	71.1	42.3	60.8
Electricity generated by hydropower (% of total)	22.3	46.5	13.1
CO <sub>2</sub> emissions per capita (metric tons)	4.6	2.9	11.1

En la Conferencia de Naciones Unidas para el Cambio Climático se plantearon objetivos a los sistemas energéticos mundiales. El análisis del Organismo Internacional de Energía (AIE) ha encontrado que considerar una acción ampliada en eficiencia energética y energía renovable es vital para continuar en un camino consistente en limitar el calentamiento a 2°C. Tal como muestra el gráfico siguiente se necesita un conjunto amplio de tecnologías y acciones, eficiencia energética y energías renovables, captura y almacenamiento de carbono (CCS), la energía nuclear y la conmutación de combustibles para uso final.

El uso de energías renovables también debe ampliarse para el calor y el transporte: su importancia aumenta en los esfuerzos para dirigir un aumento de temperatura por debajo de 2 °C, ya que la industria y el transporte generan el 57% de las emisiones. La gestión de la demanda de energía es una herramienta vital para reducir las emisiones, en particular mediante medidas de eficiencia energética que mejoran la productividad energética y, por

consiguiente, reducen la cantidad de energía necesaria para apoyar el crecimiento económico continuado [4].

#### Measures needed to surpass current NDCs to reach 2°C trajectory (450 Scenario), through 2040



Note: The New Policies Scenario (NPS) is the central scenario of the World Energy Outlook and includes the energy-related components of NDCs submitted by 1 October 2015.

Source: Adapted from IEA (2015b), World Energy Outlook 2015.

En particular, haciendo foco en la generación de energía eléctrica se observa que las centrales eléctricas de carbón y gas generan el 63% de la oferta mundial de electricidad y producen más del 40% de las emisiones del sector energético mundial.

### LAS ENERGÍAS RENOVABLES COMO PARTE DE LA SOLUCIÓN

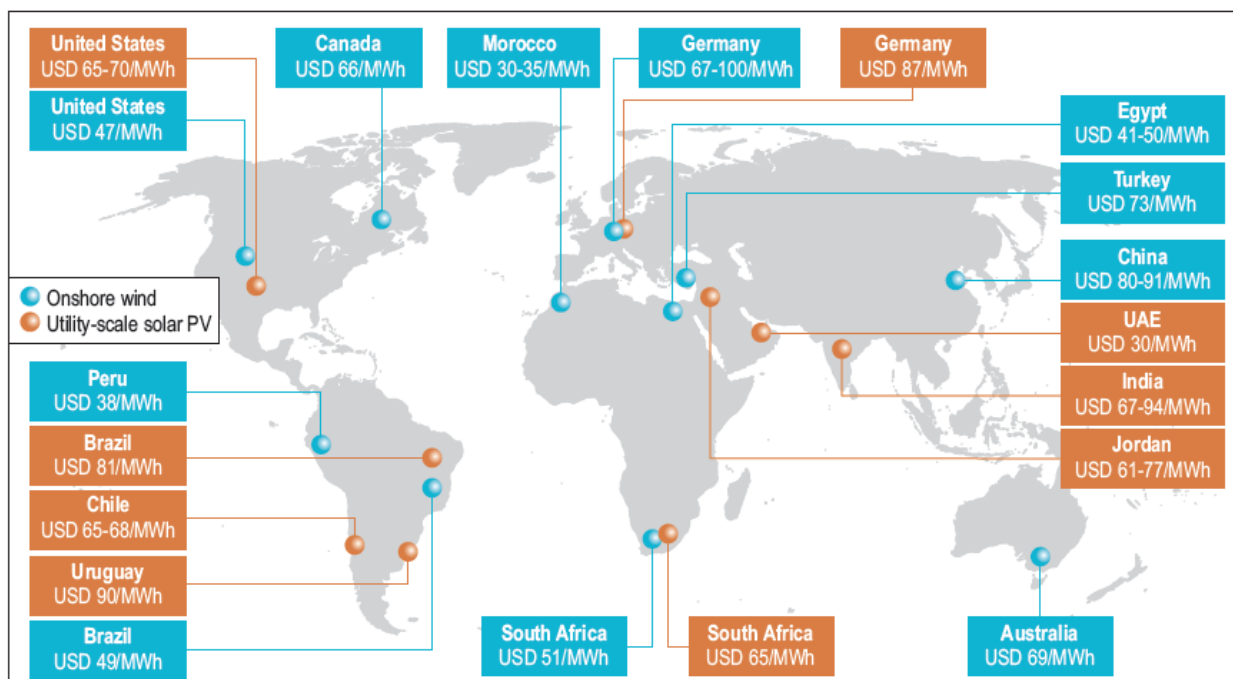
A nivel global se está impulsando de manera significativa la inversión y el despliegue de energías renovables. Los anuncios desde la COP22 han tenido un impacto positivo en la tasa esperada de adiciones de capacidad renovable. Sin embargo, las inversiones se mantienen por debajo de los niveles compatibles con los objetivos climáticos a largo plazo. Mientras que la energía solar fotovoltaica y la energía eólica terrestre se han vuelto competitivas con otras fuentes de electricidad, la energía solar concentrada, la energía eólica marina y otras tecnologías renovables requieren un mayor apoyo político.

El sólido crecimiento mundial en el despliegue de energía renovable integrado en la red fue apoyado por una variedad de políticas que abordan la seguridad energética, los problemas de contaminación local y los objetivos climáticos. Se han observado disminuciones significativas en costos y se observa que los costos de generación más bajos se consiguen en mercados que se benefician tanto de recursos abundantes como de adquisiciones competitivas de contratos a largo plazo, proporcionando flujos de ingresos garantizados respaldados por políticas y marcos de mercado seguros a largo plazo. Estas condiciones crean oportunidades de financiamiento de bajo costo, una dimensión crítica de la competitividad de este tipo de proyectos [4].

Un desafío fundamental es que los precios de los combustibles fósiles siguen siendo bajos. Los bajos precios de los combustibles fósiles pueden complicar la transición a los combustibles de energía limpia, ya que pueden atraer a los encargados de la formulación de políticas en las perspectivas a corto plazo y frenar el apoyo a las tecnologías de energía limpia y a la eficiencia energética.

A nivel global se destaca [5] que se requerirán más cambios en las políticas para centrarse en las oportunidades, estos incluyen un mayor apoyo a las energías renovables como la energía eólica marina, electricidad solar térmica (STE) y geotérmica que aún no han alcanzado la madurez comercial de la energía solar fotovoltaica y el viento en tierra (eólica onshore), mecanismos para facilitar una mejor integración de las grandes energías renovables en la red, una mayor expansión de las energías renovables en calor y transporte y la gestión de la competencia de los bajos precios de los combustibles fósiles.

## Long-term contract prices for new renewable power to be commissioned, 2016-19



This map is without prejudice to the status of or sovereignty over any territory, to the delimitation of international frontiers and boundaries and to the name of any territory, city or area.

Notes: Values reported in nominal USD include preferred bidders, power purchase agreements (PPAs) and feed-in tariffs (FITs); US values are calculated excluding tax credits; Delivery date and costs may be different than those reported at the time of the auction.






Source: Adapted from IEA (2015a), Medium-Term Renewable Energy Market Report 2015.

En muchos países, como es el caso de Argentina, la integración de la red y la disponibilidad de financiación asequible siguen siendo los desafíos más importantes y las políticas de apoyo son aun el principal motor de desarrollo. Tales políticas de apoyo forman parte integrante de la política energética de un país o región. En este sentido, las energías renovables plantean una gran cantidad de oportunidades e inmensos desafíos para la Argentina.


## POLÍTICA ENERGÉTICA Y OPORTUNIDADES DE DESARROLLO EN ARGENTINA

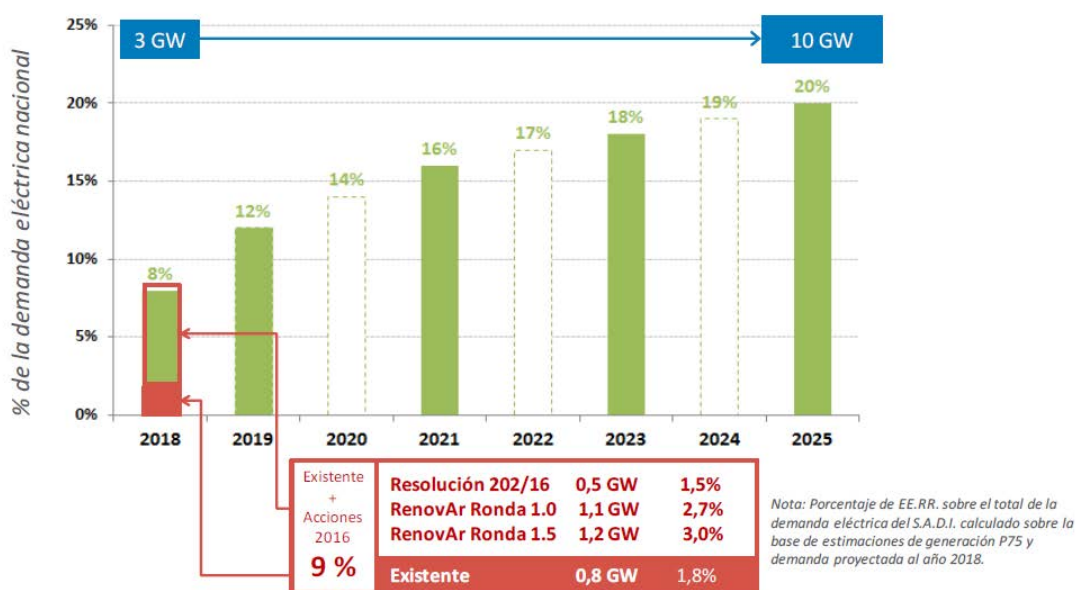
La Ley 27.191 modificó la Ley 26.190 "Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica". Entre otros, en la misma, se redefinió el objetivo del Régimen sustituyéndolo por lograr una contribución de las fuentes de energía renovables hasta alcanzar el ocho por ciento (8%) del consumo de energía eléctrica nacional, al 31 de diciembre de 2017, se estableció la segunda etapa del Régimen con objetivos definidos hasta diciembre de 2025, se creó el Fondo Fiduciario para el Desarrollo de Energías Renovables (FODER) y se estableció la Contribución de los Usuarios de Energía Eléctrica al Cumplimiento de los Objetivos del Régimen de Fomento. Durante el año 2016 se llevaron a cabo dos licitaciones RenovAR 1 y RenovAR 1,5 que adjudicaron 29 y 30 proyectos respectivamente. Tal como se muestra en las siguientes tablas, la mayoría de los proyectos fueron de energía eólica y solar fotovoltaica.

**Total de Proyectos Adjudicados: 29**

Tecnología	Proyectos	MW	GWh/año	u\$s/MWh
 Eólica	12	708	3002	59
 Solar	4	400	959	60
 Biogas	6	9	58	154
 Biomasa	2	15	121	110
 PAH (Pequeños Aprovechamientos Hidráulicos)	5	11	65	105
<b>Totales</b>	<b>29</b>	<b>1143</b>	<b>4205</b>	<b>63</b>

**3.1% del Consumo Eléctrico Nacional**

TECNOLOGÍA	CANTIDAD DE PROYECTOS	POTENCIA ADJUDICADA MW	PRECIO PROMEDIO USD / MWh	ENERGIA ANUAL GWh / Año
 EÓLICA	10	765,4	53,34	3.037
 SOLAR	20	516,2	54,94	1.274
<b>Total</b>	<b>30</b>	<b>1.281,5</b>	<b>53,98</b>	<b>4.311</b>



A través de las licitaciones llevadas a cabo durante el año 2016 se aseguró el objetivo para fines de 2017 de abastecer como mínimo un 8% de la demanda del país con energía de fuentes renovables. A nivel mundial, las tecnologías de energía renovable para generación de electricidad han tenido un significativo progreso en los últimos años. Algunas tecnologías se han vuelto competitivas en costos con la generación convencional de energía. Sin embargo, en muchos casos, las políticas de apoyo son aún el principal motor de desarrollo. Tales políticas de apoyo son parte integrante de la política energética de un país o región.

Toda política energética ha de ser soportada por tres pilares: Competitividad, Seguridad de abastecimiento y Sostenibilidad Ambiental.

Para avanzar en este camino debe tenerse presente que existe un cambio de paradigma en el sistema energético. Se observa una transición de la centralización a producción localizada diversa. El futuro del sector eléctrico involucra un amplio mix de combustibles fósiles y renovables, generación descentralizada, capacidad de almacenamiento expandida, demanda más eficiente y planeamiento de abastecimiento a través de flujos inteligentes de datos en tiempo real: Redes inteligentes (smart grids).

Si bien en Argentina se ha avanzado, en proyectos conectados a la red con mínimos de capacidad de 1MW, en el mundo, el modelo de negocio de los servicios centralizados, mediante el cual las empresas obtienen beneficios mediante la entrega de potencia a través de una red centralizada, se está desplazando hacia un modelo local distribuido con el aumento de la penetración de las energías renovables a pequeña escala. Esto está transformando los consumidores tradicionales en prosumidores. Para ello deben



desarrollarse los instrumentos técnicos y regulatorios necesarios que permitan esta transición.

La viabilidad técnica y económica de proyectos de energía renovable depende del riesgo de los mercados en los que los proyectos se desarrollan. Se puede hacer frente a estos riesgos, asegurando la estabilidad y la previsibilidad de las políticas. Las tecnologías de energía renovable requieren de apoyo a lo largo de algunas de las etapas de su ciclo de vida, ciencia básica, la investigación y el desarrollo. Apoyo financiero para la investigación, desarrollo y demostración, así como mecanismos de apoyo a la innovación.

El nuevo paradigma del mercado de la electricidad, impulsada por los avances tecnológicos, crea desafíos de política. La generación distribuida de electricidad en combinación con las tecnologías de la información y de almacenamiento permiten una nueva forma de operación. El papel de las redes centralizadas tendería a reducirse en favor de mini-redes y otras soluciones fuera de la red.

Se observa que la evolución del mercado es dinámica. El sector de las energías renovables se desarrolla con rapidez, por lo que las políticas y medidas de apoyo deben actualizarse permanentemente y basarse en información reciente. La planificación adecuada es necesaria para el desarrollo oportuno de las infraestructuras de red, la inversión en infraestructura y tecnologías inteligentes de almacenamiento y el desarrollo de marcos regulatorios. Reducción de los subsidios a los combustibles fósiles.

Según la Agencia Internacional de Energía Renovable, IRENA [6] la mayor parte de las futuras inversiones en energía renovable es probable que provenga del sector privado y la captación de inversiones dependerá de la competitividad en costos, que está fuertemente influenciada por el costo de la implementación de la tecnología y los riesgos de mercado para la financiación de proyectos de energía renovable.

La creación de un entorno favorable a la inversión implica la reducción de riesgos, el diseño de productos financieros innovadores, adaptándose el apoyo del gobierno a las cambiantes condiciones del mercado y la transformación de los modelos de negocio de servicios públicos. En comparación con la generación de energía fósil, las tecnologías de energía renovable tienen una alta incidencia de costos de capital iniciales por sobre los costos de operación, haciendo la viabilidad de tales proyectos particularmente sensibles al costo del capital. Actualmente pueden obtenerse rendimientos promedio de entre el 6% y el 10% para la mayoría de los proyectos de energía renovable en los mercados desarrollados.

Las políticas que promueven las energías renovables pueden abordar simultáneamente los objetivos económicos, sociales y medioambientales. Por lo que si bien puede resultar motivación suficiente para trabajar en este sentido la necesidad urgente de un cambio de actitud para mitigar el cambio climático, la evaluación de políticas que promuevan las energías renovables puede realizarse con un enfoque amplio e integral. Tal enfoque permitirá evaluar la contribución de las energías renovables a objetivos estratégicos de un país o región, económicos y sociales.

Existe una opinión generalizada de que las energías renovables, mientras más favorables al medio ambiente, son demasiado caras. Sin embargo esta disyuntiva económica percibida de "barato vs. limpia es cada vez menos cierta.

Al realizar un análisis integral de los costos y beneficios de las diferentes formas de energía debe tenerse en cuenta una visión mucho más amplia de desarrollo económico, incluyendo la balanza comercial, el desarrollo industrial, el crecimiento del producto bruto interno (PIB), el empleo, el acceso a la energía y la salud.

*Mejora de la balanza comercial.* El despliegue de las energías renovables puede no afectar la balanza comercial positiva en el corto plazo. Las importación de tecnologías de energía renovable permitiría la reducción de las importaciones de combustibles fósiles por un período significativo de tiempo (por ejemplo, 20 años), por lo que es probable que sea positivo el efecto a largo plazo sobre la balanza comercial.

*Aumento del Producto Bruto Interno.* Un creciente número de estudios muestran que el impacto de las energías renovables en el PBI es positivo, sobre todo si la energía renovable es más barata que otras alternativas.



*Agregado de valor local.* Todos los países pueden aportar un valor añadido local significativo a través de la instalación y mantenimiento de sistemas de energía renovable. Mientras que algunos elementos de tecnología avanzada es probable que tenga que ser importados, la localización de contenidos puede crear puestos de trabajo y desarrollar la capacidad interna.

La fabricación de tecnología de energía renovable es más intensiva en mano de obra que el carbón, el gas natural o nuclear.

*Creación de puestos de trabajo.* La creación de empleo está adquiriendo cada vez más importancia en el debate global de energía renovable. Aun hay poca evidencia empírica sobre este aspecto. Además de la fabricación, existe un considerable potencial para la creación de valor en la instalación, operación y mantenimiento de proyectos de energía renovable. Anticipar los requisitos de formación y promover la provisión de educación y formación adecuada en el sector es un desafío que atender.

*Ampliación del acceso a la energía.* El acceso a la energía moderna es esencial para el desarrollo económico. La naturaleza modular, escalable y descentralizada de las energías renovables significa que pueden ser adaptadas a las condiciones locales y proporcionan una amplia gama de servicios de energía en función de las necesidades y el poder de compra de los usuarios finales.

*Reducir el impacto ambiental.* Todas las formas de suministro de energía, incluida la energía renovable, tienen un impacto en el medio ambiente. Sin embargo, el impacto es mucho menor que en el caso de las energías convencionales, desde la fabricación hasta la operación y desmantelamiento al final de su vida.

## CONCLUSIONES

En cualquier discusión sobre el futuro de la energía, es crucial tener claro lo que está en juego. El sector eléctrico es responsable de más del 40% de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

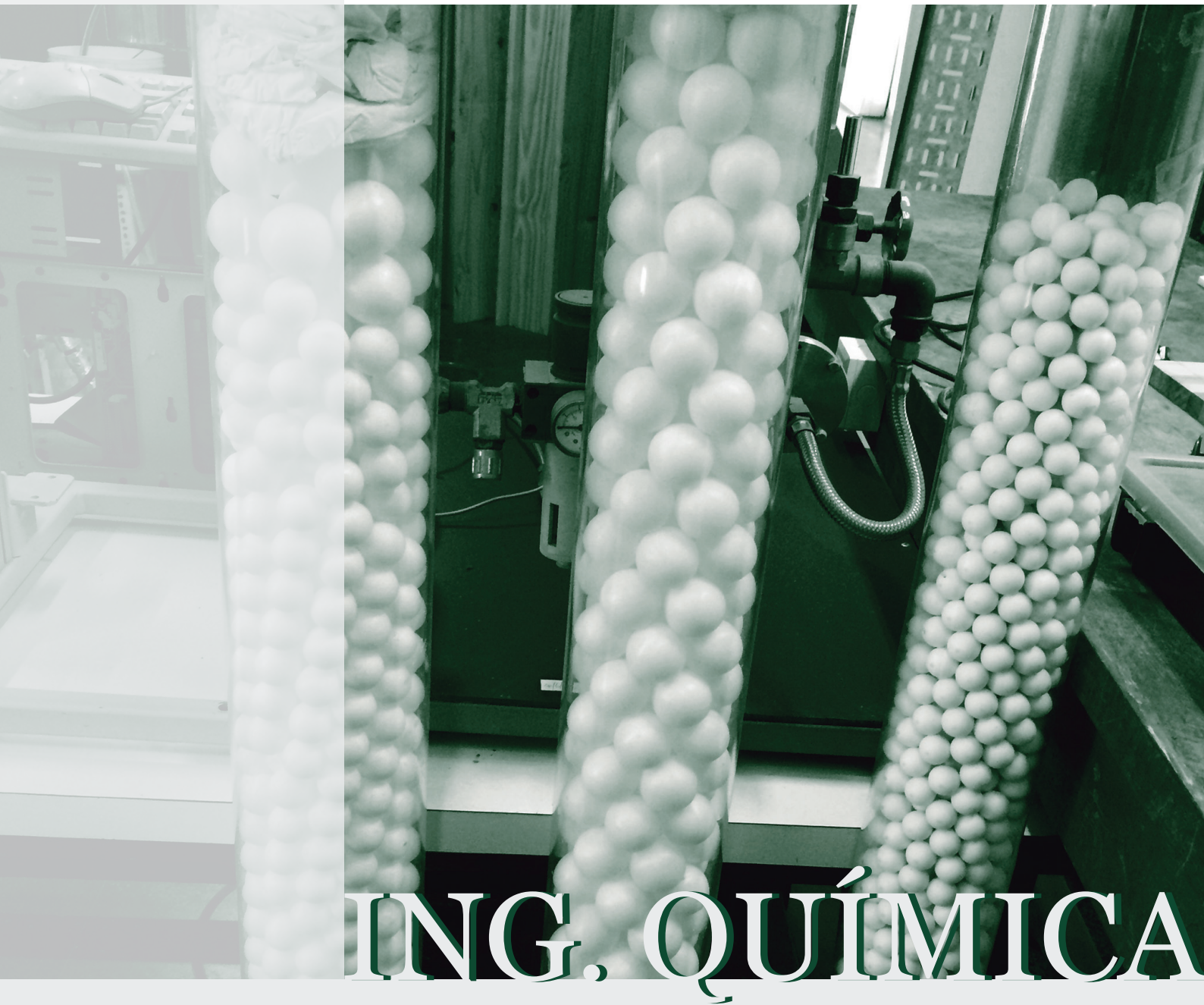
Se necesitan nuevos enfoques para descarbonizar la economía mundial y es necesario un cambio radical para evitar un cambio climático catastrófico. Esto presenta a la sociedad toda varios desafíos. En muchos países, como es el caso de Argentina, la integración de la red y la disponibilidad de financiación asequible siguen siendo los desafíos más importantes y las políticas de apoyo son aun el principal motor de desarrollo. Argentina está empezando a transitar este camino. Si bien las modificaciones introducidas con la ley al Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica y su decreto reglamentario favorecen el sendero de desarrollo de energías renovables aún hay mucho por hacer. Las motivaciones para su desarrollo son amplias y pueden verse desde su contribución a los objetivos estratégicos del país. Las energías renovables podrían mejorar el acceso a la energía, crear puestos de trabajo, promover un desarrollo más sostenible y equitativo, y ofrecer un servicio eléctrico más seguro. Si las instancias decisorias quieren incrementar el índice de penetración de energías renovables y, al mismo tiempo, cumplir los ambiciosos objetivos de mitigación del cambio climático, los compromisos a largo plazo y una actitud flexible serán fundamentales. En este contexto, es fundamental un compromiso firme y a largo plazo para la creación de un sistema de energía diversa, flexible y ambientalmente sostenible.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (2011). Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático. Informe Especial. Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico.
- [2] ESRB Advisory Scientific Committee (2016) Too late, too sudden: Transition to a low-carbon economy and systemic risk. Reports of the Advisory Scientific Committee No 6/February 2016.
- [3] International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, 2016. From World Development Indicators. The Little Green Data Book 2016.
- [4] International Energy Agency (IEA), 2016. Energy, Climate Change and Environment. 2016 Insights.

[5] IRENA, 2012. Financial Mechanisms and Investment Frameworks for Renewables in Developing Countries.

[6] IRENA, 2014. Rethinking Energy: Towards a new power system.



ING. QUÍMICA

## **SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL PROCESAMIENTO INTEGRAL DE VEGETALES PRE-COCIDOS CONGELADOS ACOPLANDO LAS CINÉTICAS DE INACTIVACIÓN ENZIMÁTICA DE PEROXIDASA Y LIPOXIGENASA EN LA ETAPA DE PRE-COCCIÓN**

Pérez-Calderón, John (1), Califano, Alicia (1), Santos, Victoria (1-2), Zaritzky, Noemí (1-2)

(1) Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de la Plata, CONICET, CIC-PBA, Argentina.

(2) Depto. de Ingeniería Química- Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina. Dirección postal: 47 y 116 (CP. 1900)

[mvsantosd@gmail.com](mailto:mvsantosd@gmail.com), [zaritzkynoemi@gmail.com](mailto:zaritzkynoemi@gmail.com)

### **1. INTRODUCCIÓN**

Dentro de la familia de las Brassicacea conocidas comúnmente como crucíferas se encuentra una gran cantidad de especies; entre ellas los repollitos de Bruselas (*Brassica oleracea gemmifera*), estos vegetales poseen importantes beneficios para la salud ya que son alimentos ricos en fibra, compuestos antioxidantes como polifenoles, ácido ascórbico (Vitamina C) y anticancerígenos como glucosinolatos (Fahey y col., 2001). Estos compuestos ayudan a retrasar el envejecimiento celular, a prevenir ciertas enfermedades como el cáncer, además de reducir el colesterol sanguíneo. En la actualidad es frecuente encontrar alimentos listos para el consumo "Ready to eat" siendo los vegetales pre-cocidos congelados un segmento importante del mercado. Los vegetales congelados requieren en general de un proceso previo de cocción para que puedan ser conservados correctamente. Los repollitos de Bruselas contienen enzimas como lipoxigenasa (LOX) y peroxidasa (POD) responsables de su deterioro aun cuando son conservados congelados. POD es utilizada frecuentemente como indicadora del proceso dada su estabilidad térmica; por otro lado la presencia de LOX está asociada a modificaciones indeseables de olor y sabor. La completa inactivación de estas enzimas implica pérdida de atributos de calidad debido a una sobre-cocción. Para establecer tiempos adecuados de pre-cocción a nivel industrial, la simulación computacional aplicada a procesos de transferencia de energía es fundamental para la optimización del proceso. Las constantes cinéticas de inactivación enzimática y sus energías de activación son parámetros necesarios para determinar tiempos óptimos de tratamiento térmico. En este sentido los objetivos del trabajo son: a) determinar la cinética de inactivación de las enzimas POD y LOX, b) acoplar las cinéticas de inactivación a modelos numéricos de transferencia de energía para simular computacionalmente la etapa de pre-cocción, c) establecer los cambios en parámetros de calidad luego del almacenamiento congelado d) analizar la relación que existe entre los atributos de calidad y la actividad enzimática residual para optimizar el proceso.

### **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **2.1 Preparación del extracto enzimático e inactivación enzimática**

Se preparó un extracto enzimático a partir del vegetal fresco, esto se llevó a cabo pesando 30 g para la determinación de LOX y 1.5 g para POD de la muestra vegetal, luego esta se homogeneizó en un buffer de fosfato de potasio (0.2 M pH 6.5 a 4°C), posteriormente se llevó a un Stomacher Labblender modelo 400 (Seward Medical Ltda., Inglaterra) durante 5 minutos; pasado el tiempo se filtró usando un lienzo. El filtrado fue centrifugado por 30 minutos a 4 °C y una velocidad de 18000 x g usando centrifuga Beckman Avanti modelo J-25 (Beckman Instruments Inc., U.S.A) con un rotor JA-2550. El sobrenadante se dispuso en microtubos de plástico de 2 µL. Para el ensayo de la cinética de inactivación se sumergieron los microtubos en un baño termostático a diferentes temperaturas de calentamiento (70-90°C) extrayéndolos cada 10-20 segundos (tiempo máximo 400s); las muestras retiradas del calentamiento se enfriaron rápidamente en un baño hielo-agua (0°C), cada ensayo de



inactivación enzimática se realizó por duplicado. La Actividad Enzimática (AE) se determinó por espectrofotometría, mezclando 120  $\mu\text{L}$  del extracto enzimático con 3.5 mL de sustrato específico de acuerdo a la enzima estudiada; para POD se analizó según Morales-Blancas y col., (2002) formulando el sustrato con 0.1 mL de peróxido de hidrogeno (30% m/v), 0.1 mL de guayacol (99 % m/v) y completando el volumen a 100 mL con buffer de fosfato de potasio 0.1 M pH 6,5. Para la LOX se utilizó el método descrito por Morales-Blancas y col., (2002) en el cual el sustrato fue preparado mezclando 78.6  $\mu\text{L}$  de ácido linoleico (>98%), 78.6  $\mu\text{L}$  de Tween-20 y 10 mL agua destilada. La solución es clarificada agregando 1 mL de NaOH 1M, se completó el volumen a 100 mL con buffer de fosfato de potasio 0.2 M pH 6.5. La AE se midió a través del cambio de la absorbancia a 470 nm para POD y 234 nm para LOX.

## 2.2 Cinéticas de inactivación enzimática

Se adoptó el modelo de Ling y Lund (1978) para analizar las cinéticas de inactivación enzimáticas de las fracciones de isoenzimas con distinta estabilidad térmica (fracciones lábil y resistente) suponiendo que cada fracción sigue una reacción de primer orden. Este comportamiento se expresa matemáticamente como:

$$\%AE = \frac{Co_R e^{-k_R t} + Co_L e^{-k_L t}}{Co_R + Co_L} \quad (1)$$

donde  $t$  es el tiempo (s) de calentamiento a temperatura constante,  $Co_L$  y  $Co_R$  son las concentraciones iniciales de la isoenzima termolábil y termoresistente en unidades de actividad enzimática (AE/g seco), y  $k_L$  y  $k_R$  son constantes de reacción de inactivación térmica (1/s). Según el método de Ling y Lund (1978) se realizaron dos simplificaciones; la primera consiste en que a tiempos largos de calentamiento toda la fracción lábil es inactivada (menos de un 1% de la isoenzima lábil queda activa). Por lo tanto en la **Ec.1** el término  $e^{-k_L t}$  tiende a cero, obteniendo la **Ec.2**.

$$\%AE = \frac{Co_R}{Co_R + Co_L} \cdot e^{-k_R t} \quad (2)$$

Se define la fracción de la isoenzima resistente  $\alpha_R$  como:

$$\alpha_R = \frac{Co_R}{Co_R + Co_L} \quad (3)$$

Por otro lado a cortos tiempos de calentamiento, la fracción resistente inactivada se consideró despreciable por lo tanto en la **Ec. 1** el término  $e^{-k_R t}$  tiende a 1, obteniendo la ecuación:

$$\%AE = \frac{Co_R + Co_L e^{-k_L t}}{Co_R + Co_L} = \alpha_R + \alpha_L \cdot e^{-k_L t} \quad (4)$$

donde  $\alpha_L$  es la fracción porcentual de la isoenzima lábil. Al aplicar logaritmo natural a las **Ecs. 2 y 4** y regresionando utilizando ORIGIN 8.0 y SYSTAT12 se calculó  $\alpha_R$ ,  $k_R$ ,  $k_L$  a cada temperatura (Yamamoto y col., 1961). Según la ley de Arrhenius las constantes pueden ser descriptas como:

$$k = k_{REF} \cdot e^{\frac{-E_a}{R} \left( \frac{T_{REF} - T}{T_{REF} \cdot T} \right)} \quad (5)$$

donde  $T$  es Temperatura (K),  $k_{REF}$  es la constante de reacción de referencia a una temperatura determinada ( $T_{REF}$ ) la cual corresponde 353 K,  $R$  es la constante de los gases ( $R=8.31 \text{ J/mol K}$ ),  $E_a$  es la energía de activación (J/mol) de la isoenzima lábil o resistente. Insertando la **Ec. 5** en la **Ec. 2 y 4**, luego aplicar logaritmo natural resulta:

$$\text{Ln}(\%AE) = \text{Ln}(\alpha_R) - t \cdot k_{R REF} - e^{\frac{-E_{aR}}{R \cdot T} \left( \frac{T_{REF} - T}{T_{REF} \cdot T} \right)} \quad (6)$$

$$\text{Ln}(\%AE - \alpha_R) = \text{Ln}(\alpha_L) - t \cdot k_{L REF} - e^{\frac{-E_{aL}}{R \cdot T} \left( \frac{T_{REF} - T}{T_{REF} \cdot T} \right)} \quad (7)$$

En las **Ecs. 6 y 7**  $k_{R REF}$  y  $k_{L REF}$  son las constantes reacción de referencia de la fracción resistente y lábil respectivamente.  $E_{aL}$  y  $E_{aR}$  son las Energías de activación de la isoenzima



lábil y resistente, respectivamente. Al aplicar una regresión no-lineal de las **Ecs. 6 y 7** utilizando todos los valores de %AE, tiempos y temperaturas se incrementaron significativamente los grados de libertad obteniendo valores de  $E_a$ , y desviación estándar adecuados lo cual permitió calcular los correspondientes intervalos de confianza (Arabshahi y Lund, 1985).

### 2.3 Modelado matemático de transferencia de energía

Se desarrolló un código en elementos finitos para resolver la ecuación a derivadas parciales de conducción de calor en estado transiente (**Ec.8**) incorporando propiedades térmicas dependientes de la temperatura.

$$\rho(T) \cdot C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k(T) \nabla T) \quad (8)$$

En base al modelo bifásico de Ling y Lund (1978) se definen las concentraciones de isoenzima lábil y resistente a  $t=0$  y a un tiempo  $t$  durante el tratamiento térmico como:

$$C_0 = C_{0R} + C_{0L} \quad (9) \quad C = C_R + C_L \quad (10)$$

donde  $C_{0L}$  y  $C_{0R}$  son la concentración inicial de enzima lábil y resistente respectivamente.

Se integraron las ecuaciones que describen el comportamiento bifásico de las dos isoenzimas térmicamente diferentes teniendo en cuenta la temperatura en función del tiempo y la posición dentro del alimento  $T(r,z,t)$  obteniendo:

$$\frac{C_L}{C_{0L}} = \exp(-k_{LREF} \int_0^{tp} \exp\left(\frac{E_{aL}}{R} \left[\frac{1}{T(r,z,t)} - \frac{1}{T_{REF}}\right]\right) dt) \quad (11)$$

$$\frac{C_R}{C_{0R}} = \exp(-k_{RREF} \int_0^{tp} \exp\left(\frac{E_{aR}}{R} \left[\frac{1}{T(r,z,t)} - \frac{1}{T_{REF}}\right]\right) dt) \quad (12)$$

La concentración media de cada tipo de enzima a cada tiempo se calcula como:

$$\bar{C}_L = \frac{\int_V C_L(r,z,t) dV}{\int_V dV} \quad (13) \quad \bar{C}_R = \frac{\int_V C_R(r,z,t) dV}{\int_V dV} \quad (14)$$

Además se cumple que en promedio en todo el alimento la concentración media total es:

$$\bar{C} = \bar{C}_R + \bar{C}_L \quad (15)$$

De esta manera es posible estimar la concentración media de las enzimas en todo el vegetal, es decir de la fracción lábil, resistente y total en el alimento. Las integrales involucradas en cada etapa se evaluaron numéricamente; para integrar en el tiempo se utilizó la regla del trapecio y para la integral de volumen se utilizó la regla de cuadratura para triángulos.

### 2.4 Ensayo durante el almacenamiento congelado

Se realizó un ensayo de almacenamiento congelado de repollitos de Bruselas durante 4 meses, para este fin se seleccionaron muestras del vegetal con un tamaño uniforme. El peso promedio de los repollitos fue de  $17.8 \pm 0.9$  g, y sus dimensiones promedio fueron: ancho de  $30.1 \pm 1.1$  mm y  $44.2 \pm 1$  mm de altura. La pre-cocción de los repollitos de Bruselas se llevó a cabo en un baño de agua termostático Techne Modelo FTE-10DDC (Bibby-científica Ltda, Stone Staffordshire, Reino Unido) a  $90$  °C. Las muestras se retiraron del baño a los 3, 6 y 10 minutos e inmediatamente se sumergieron en un baño de agua/hielo. Posteriormente se mantuvieron congelados durante 4 meses a  $-20$ °C.

Se realizó la determinación de la actividad enzimática para POD y LOX, cantidad de ácido ascórbico (AA) y variación del color de las muestras de los repollitos después del tratamiento de pre-cocción (**AAC**) y al finalizar el almacenamiento congelado (**DAC**). Para los parámetros se obtuvo datos del interior del repollito (zona apical) como para de las hojas exteriores (zona exterior). Los cambios de color durante el almacenamiento congelado fueron determinados usando un colorímetro Konica Minolta CR-400 (Osaka, Japón) utilizando el espacio CIELab definido por tres coordenadas colorimétricas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ . A partir

de estas coordenadas se calculó ángulo hue ( $h^\circ$ ) y el índice de pardeamiento (BI)

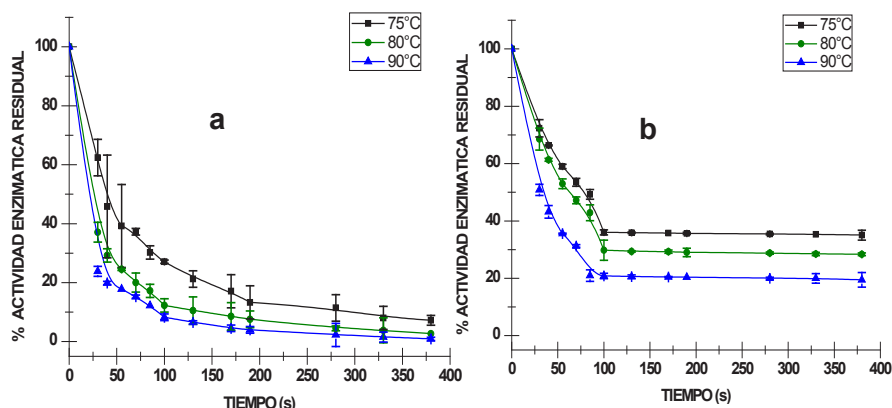
$$h^\circ = 180 + \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad BI = \frac{[100(x-0.31)]}{0.172} \quad \text{siendo } x = \frac{(a^*+1.75 L^*)}{(5.645 L^*+a^*-3.012 b^*)} \quad (16)$$

La determinación del contenido de AA en las muestras de repollito de Bruselas se llevó a cabo realizando extractos de la muestra vegetal en ácido metafosfórico al 5% p/v; la cuantificación se llevó a cabo en un equipo Waters de HPLC (Waters 1525 Binary HPLC Pump; Detector UV-Waters 2998). Las separaciones se llevaron a cabo con una columna RP-C18 columna 4.6x150 mm, 5  $\mu$ m (Waters, Milford, MA, USA), se usó un detector UV-Visible una longitud de onda de 245 nm. Se utilizó como fase móvil una solución isocrática de ácido metafosfórico al 0.5% (p/v) mezclada con acetonitrilo en una proporción de 93:7 respectivamente. Al finalizar el almacenamiento se realizó la evaluación de los atributos sensoriales. Esta prueba de aceptabilidad se llevó a cabo utilizando una escala hedónica de 9 puntos para determinar el nivel de agrado del producto final, este tipo de prueba se analiza mediante análisis de varianza y comparaciones de medias por parte de los atributos estudiados de las muestras (Lawless y Heymann, 2010).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**3.1 Composición proximal y propiedades térmicas:** Siguiendo la metodología descrita por la AOAC (2010) la composición proximal fue: humedad 83.54%  $\pm$  0.58, proteína 3.20%  $\pm$  0.06, lípidos 0.36 %  $\pm$  0.02, cenizas 1.19 %  $\pm$  0.02 y carbohidratos por diferencia 11.74% (valores corresponden al valor promedio con los correspondientes intervalos de confianza). La conductividad térmica y la densidad global determinadas fueron 0.614 W/m<sup>2</sup>K y 1.023x10<sup>3</sup> Kg/m<sup>3</sup> respectivamente según el modelo expuesto por Choi y Okos (1986).

**3.2 Cinética de inactivación enzimática:** Se obtuvieron las curvas experimentales del porcentaje de enzima residual (%AE) vs tiempo a distintas temperaturas de calentamiento (75-90°C), detectando la presencia de isoenzimas termo-lábiles y termo-resistentes para ambas enzimas (POD y LOX). En la **Fig.1a,b** se muestran las curvas de inactivación enzimática. Este comportamiento bifásico se ha observado en brócoli para ambas enzimas (Morales-Blancas y col., 2002), no existen datos reportados hasta el momento para repollitos de Bruselas. A partir de las curvas inactivación enzimática y mediante regresiones no lineales se obtuvieron las constantes de inactivación enzimática usando las **Ecs.2** y **4** a diferentes temperaturas para las dos enzimas estudiadas.



**Figura 1.** Curvas de inactivación enzimática de repollitos de Bruselas a diferentes temperaturas y tiempos para (a) Peroxidasa (b) Lipoxigenasa. Las barras de error muestran el intervalo de confianza ( $p=0.05$ ) de los datos experimentales.

En la **Tabla 1** se pueden observar los valores obtenidos. Las energías de activación de cada una de las dos fracciones en el vegetal se determinaron en base a las **Ecs.6** y **7**.

**Tabla 1.** Constantes cinéticas de inactivación enzimática de POD y LOX en repollitos de Bruselas para cada fracción termoresistente y termolábil. Los datos reportados son el valor estimado de la regresión, su correspondiente desviación estándar en paréntesis y el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) obtenido de la regresión

T (°C)	POD					LOX			
	$k_L$ ( $\times 10^{-2} s^{-1}$ ) n= 10	$R^2$	$k_R$ ( $\times 10^{-3} s^{-1}$ ) n= 14	$R^2$		$k_L$ ( $\times 10^{-2} s^{-1}$ ) n= 8	$R^2$	$k_R$ ( $\times 10^{-4} s^{-1}$ ) n= 16	$R^2$
75	3.11 (0.21)	0.95	3.85 (0.36)	0.93		1.85 (0.02)	0.99	0.80 (0.04)	0.98
80	4.24 (0.42)	0.92	5.37 (0.15)	0.98		2.05 (0.02)	0.99	1.61 (0.16)	0.89
90	7.87 (0.18)	0.99	7.47 (0.24)	0.98		2.80 (0.06)	0.98	2.14 (0.18)	0.90

En la **Tabla 2** se muestran los resultados de las energías de activación y la fracción inicial de enzima resistente ( $\alpha_R$ ) para los dos enzimas.

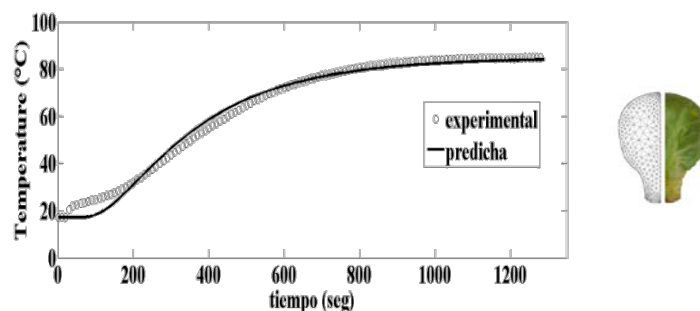
**Tabla 2.** Energías de activación y fracción inicial de enzima resistente ( $\alpha_R$ ) para las dos enzimas. Los datos reportados son valor estimado de la regresión, su correspondiente desviación estándar en paréntesis y el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) obtenido de la regresión.

	$E_{aL}$ (kJ/mol)	$R^2$	$E_{aR}$ (kJ/mol)	$R^2$	$\alpha_R\%$
<b>POD</b>	62.5(1.9) n=30	0.97	56.3(3.0) n=38	0.92	25.02 (1.04)
<b>LOX</b>	65.8 (4.5) n=26	0.97	63.7 (2.8) n=20	0.96	30.97(1.03)

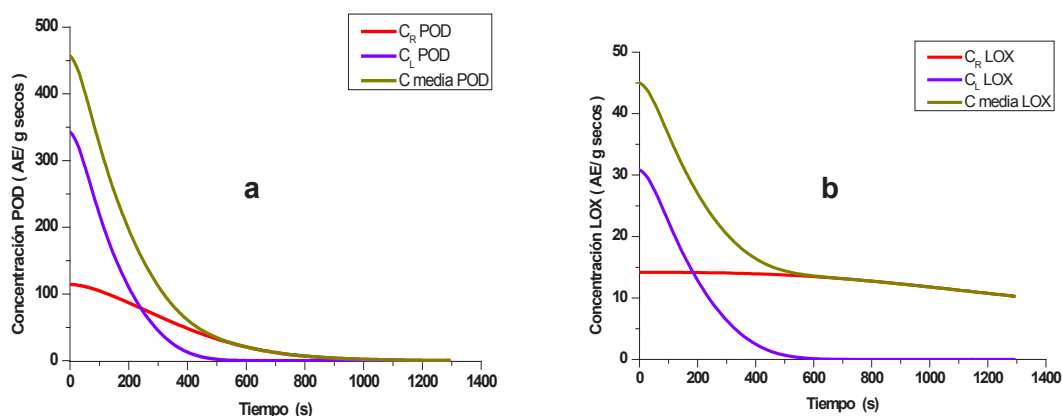
### 3.3. Modelado matemático del tratamiento térmico

La transferencia de energía durante el tratamiento térmico se simuló numéricamente, para esto se resolvió la **Ec.8** a derivadas parciales en estado no estacionario, mediante el método de los elementos finitos en Matlab acoplado la cinética de inactivación térmica de POD y LOX al programa principal. Los repollitos de Bruselas tienen una geometría irregular que puede asimilarse a un sólido de revolución. Se tomaron imágenes digitales de cada muestra a procesar para obtener el contorno irregular para luego generar la superficie de revolución y la estructura general de la malla en nodos y elementos triangulares. En la **Fig. 2** se puede observar la imagen digital, su contorno irregular y discretización en elementos triangulares. Las predicciones numéricas concordaron satisfactoriamente con los resultados experimentales para los procesos térmicos a los cuales fueron sometidos los vegetales. El desvío estándar promedio (root mean square error= RMSE) calculado mediante la ecuación:  $RMSE = \sqrt{\frac{\sum (T_{exp} - T_{pred})^2}{N}}$ , donde N es el número de datos, fue de 2.47°C. En la **Fig.**

**2** se representan las temperaturas predichas por el modelo numérico y la temperaturas registradas con el adquisidor para uno de los experimentos realizados (temperatura baño termostático 85°C), como puede observarse existe una excelente concordancia. En la **Fig. 3 a** y **b** se muestran las predicciones numéricas del modelo desarrollado en el presente trabajo, que indican las variaciones de la concentración media de las enzimas POD y LOX en todo el vegetal y sus fracciones lábil y resistente en función del tiempo de calentamiento a 85°C.



**Figura 2.** Temperaturas experimentales y predichas por el modelo durante el tratamiento térmico. Posición de la termocupla  $r=0$ ,  $z=25 \times 10^{-3}$  en metros. Temperatura del agua  $85^{\circ}\text{C}$



**Figura 3.** Inactivación de enzima total (curva verde), fracción lábil (curva azul) y resistente (curva roja) expresada como AE/g producto seco; (a) POD (b) LOX

### 3.4 Evaluación de atributos calidad posterior al almacenamiento congelado

Se evaluaron atributos de calidad luego de la pre-cocción y posterior al almacenamiento congelado a  $-20^{\circ}\text{C}$  durante 4 meses. Se analizó el efecto del %AE en los cambios de color y el contenido de ácido ascórbico en la zona interna (apical) y en la capa exterior del vegetal. En el caso de tiempos cortos de pre-cocción a alta temperatura ( $3 \text{ minutos}-90^{\circ}\text{C}$ ) se observó una reactivación enzimática del POD después del almacenamiento que pudo ser relacionada directamente con un incremento en el pardeamiento del vegetal. Estas muestras fueron descartadas para el análisis sensorial debido a sus alteraciones enzimáticas luego del almacenamiento. De la prueba sensorial se obtuvo que para los atributos analizados (Aceptabilidad general, color interno, color externo, aroma y textura) los repollitos de Bruselas pre-cocidos congelados obtuvieron buena aceptabilidad sensorial. Los evaluadores no detectaron olores indeseables, cuyo origen puede atribuirse a la acción de la LOX que genera hidroperóxidos y compuestos volátiles. Esto permite afirmar que los repollitos pre-cocidos congelados y almacenados presentaron características óptimas de calidad.

## 4. CONCLUSIONES

Se determinaron experimentalmente los parámetros cinéticos de inactivación enzimática en repollitos de Bruselas para la POD y LOX detectando un comportamiento bifásico (fracción termolábil y termo-resistente). Se calcularon las constantes de inactivación de cada fracción en ambas enzimas y mediante regresiones no-lineales se obtuvieron las energías de activación y la fracción inicial de isoenzima termolábil y termoresistente. Se modeló matemáticamente el proceso de calentamiento en del vegetal acoplado las cinéticas de inactivación enzimática lo cual permitió el cálculo de la concentración media de las enzimas después de distintos tratamientos térmicos. Se observó reactivación enzimática después del

almacenamiento congelado a tiempos cortos de calentamiento. Mediante estudios sensoriales y de parámetros de calidad, se determinó que el tiempo óptimo de pre-cocción de 6 minutos a 90°C logra una inactivación enzimática adecuada para obtener un vegetal pre-cocido congelado de alta calidad.

### **BIBLIOGRAFÍA**

- Arabshahi, A y Lund, D. (1984). Considerations in calculating kinetic parameters from experimental data. *J of Food Pro Engineering*: 239-251.
- Choi, Y. y Okos, M. R. (1986). *Food Engineering and Process Applications*, Vol. 1. Transport Phenomena, L. Maguer and P. Jelen (eds.) Elsevier, New York: 93-101.
- Fahey, J.W, Zalcmann, T y Talalay, P. (2001). "The Chemical Diversity and Distribution of Glucosinolates and Isothiocyanates Among Plants." *Phytochemistry*: 5-51.
- Morales-Blancas E.F., Chandia V.E. y Cisneros-Zevallos L.,(2002). Thermal Inactivation Kinetics of Peroxidase and Lipoxigenase from Broccoli, Green Asparagus and Carrots. *Journal of Food Science*: 146-154.
- Lawless, H. T. y Heymann, H. (2010). Acceptance Testing. En *Sensory evaluation of food: principles and practices* (2nd ed., pp. 325-336). London: Springer Science y Business Media.
- Ling A, Lund D. 1978. Determining kinetic parameter for thermal inactivation of heat-resistant and heat-labile isozymes from thermal destruction curves. *J Food Sci*: 1307-1310.
- Yamamoto H.Y., Steinberg M.P. y Nelson A.I. (1962). Kinetic studies on the heat inactivation of peroxidase in sweet corn. *J Food Sci* :113-119.



## APLICACIÓN DEL BIOPOLIMERO QUITOSANO PARA LA REMEDIACIÓN DE EFLUENTES LÍQUIDOS EMULSIONADOS PROVENIENTES DE LA INDUSTRIA PETROLERA

Pérez-Calderón, John (1), Santos, María Victoria (1-2), Zaritzky, Noemí (1-2)

(1) Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos, CONICET, CIC-PBA, Argentina, Universidad Nacional de La Plata.

(2) Depto. de Ingeniería Química- Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

Dirección postal: 47 y 116 (CP. 1900)

[mvsantosd@gmail.com](mailto:mvsantosd@gmail.com) , [zaritzkynoemi@gmail.com](mailto:zaritzkynoemi@gmail.com)

### 1. INTRODUCCIÓN

Los hidrocarburos obtenidos del petróleo son una de las fuentes de energía más importantes en la actualidad. El proceso de refinación utiliza grandes cantidades de agua en varias etapas del proceso generándose efluentes líquidos contaminados. Estos efluentes deben ser tratados para cumplir con las regulaciones ambientales y mejorar su calidad antes de ser volcados en cuerpos de agua adyacente a las plantas de refinación y petroquímica. En el caso de la provincia de Buenos Aires la concentración máxima admisible de hidrocarburos en el efluente debe ser menor a 30 mg/L (Resolución 336/2003-Privincia de Buenos Aires).

Los efluentes líquidos en una planta suelen encontrarse emulsionados requiriéndose su separación en sus dos componentes mayoritarios: agua y fase oleosa (petróleo y derivados). Una de las estrategias con más frecuencia usada para la depuración de este tipo de contaminantes en las refinerías son las piletas API, en estas la separación de fases ocurre por diferencia de densidad, sin embargo es frecuente que los efluentes generados estén emulsionados siendo difícil su separación física, por ende actualmente exista la tendencia de utilizar coagulantes y floculantes que sean amigables y biocompatibles con el medio ambiente. Entre los procesos más económicos y sustentables se encuentra la utilización de biopolímeros que no generan barros tóxicos como subproducto del proceso de clarificación.

En este sentido y en el marco de nuestra participación del proyecto PIO UNLP-CONICET se propone como estrategia innovadora la utilización de biopolímeros que logren desestabilizar dichas emulsiones generando la clarificación del agua para su vertido. Los biopolímeros son ecológicamente compatibles, por ser biodegradables y no tóxicos.

El quitosano (QS) es un polisacárido lineal formado por cadenas de  $\beta$ -(1-4) D-glucosamina (unidades deacetiladas) y N-acetil-D-glucosamina (unidad acetilada). Este biopolímero se obtiene a partir de residuos sólidos de la industria pesquera como son caparzones de crustáceos, langostinos, etc. que presentan una cantidad apreciable de quitina (Q). Al desacetilar los grupos acetamida presentes en la Q se obtiene el QS, cuyas múltiples aplicaciones en alimentos, en el tratamiento de aguas, medicina etc., han sido documentadas. Es biodegradable, no tóxico y un agente coagulante/floculante. Su potencial como agente desestabilizante de emulsiones radica en que presenta grupos amino libres formando un polímero policatiónico que reacciona con las cargas negativas generando fenómenos de coagulación y floculación (Jayakumar y col., 2007). La composición y estructura del QS son muy similares a las de la celulosa; la diferencia es que el quitosano tiene un grupo amino primario en el carbono 2 del anillo de la hexosa.

Los objetivos de este trabajo fueron: (a) estudiar la acción del quitosano para la clarificación de aguas residuales de la industria del petróleo (b) analizar la capacidad desestabilizante del quitosano en solución y su poder clarificante en un sistema modelo constituido por

emulsiones estables a partir de petróleo, agua y un tensioactivo aniónico biodegradable (dodecilsulfato de sodio) **(c)** Determinar el tiempo mínimo para el cual se genera la floculación y precipitado de la fase oleosa **(d)** analizar el fenómeno de desestabilización mediante la medición de turbidez, demanda química de oxígeno (DQO), mediciones ópticas basadas en la dispersión estática de la luz y Potencial-Z.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

### 2.1 REACTIVOS Y COMPUESTOS QUÍMICOS

Los sistemas emulsionados con los que se trabajó se formularon a partir de: i) petróleo (crudo) procedente de la Patagonia Argentina; la caracterización de este material fue provista por Refinería YPF La Plata, y se describen en la **Tabla 1**, ii) agua potable y iii) como agente estabilizante dodecilsulfato sódico (SDS) el cual es un tensioactivo iónico de carácter aniónico. El Q en solución con una concentración de 0.5% p/v se preparó a partir de quitosano comercial marca Sigma con un grado de desacetilación > 85 %, el cual se disolvió en solución de ácido acético 1.5 % (v/v). Se escogió el SDS como emulsificante iónico en los sistemas debido a su alto grado de biodegradabilidad (Singer y Tjeedema, 1993).

**Tabla 1. Principales características físicas y químicas del crudo usado**

Densidad	0.8855 g/ml
Agua	0.560 % p/p
Sales	60.0 mg/Kg
Sedimento	0.038 % p/p
Número Ácido	0.8220 mg KOH/g
Azufre	0.1890 % p/p
Viscosidad cinemática /40°C	30.4 mm <sup>2</sup> /seg
Punto de Escurrimiento	-6 °C

### 2.2 EMULSIONES O/W

Las emulsiones estudiadas contenían una concentración de 2550 ppm de petróleo, en agua destilada. Se analizaron dos tipos de emulsiones con y sin presencia de SDS. La concentración de agente tensoactivo fue de 35 mM. Los sistemas emulsionados se obtuvieron con equipo Ultra Turrax T-25 (Janke & Kunkel GmbH, Staufen, Germany) a velocidad de 13500 min<sup>-1</sup> durante 5 minutos. La fase acuosa se preparó mezclando agua destilada y un agente tensoactivo aniónico biodegradable (SDS).

### 2.3 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO)

Es un método aplicable en aguas continentales (ríos, lagos o acuíferos), aguas negras, aguas pluviales o agua de cualquier otra procedencia que pueda contener una cantidad apreciable de materia orgánica. La demanda química de oxígeno (DQO) se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO<sub>2</sub>/l). La DQO se determinó utilizando un espectrofotómetro Hach DR 2800 (Loveland, Colorado, EEUU) a 620 nm, (Hach Método No.8000)

### 2.4 ESTUDIO DE LA DESESTABILIZACIÓN DE LAS EMULSIONES POR MÉTODO DE DISPERSIÓN ESTÁTICA DE LA LUZ

La desestabilización de las emulsiones se analizaron utilizando un Instrumento basado en el fenómeno de dispersión estática de la luz denominado Turbiscan; para este fin se usó un analizador óptico vertical de barrido QuickScan (Beckman Coulter; Fullerton, USA): Este es un instrumento capaz de analizar la estabilidad de sistemas coloidales y dispersiones concentradas, mediante la medición de la transmitancia y la retrodispersión (Backscattering (BS)) de un sistema atravesado por un pulso de luz correspondiente al infrarrojo cercano. La muestra a ser analizada está contenida en un tubo o celda de vidrio, colocado cerca de una

cabeza lectora compuesta por una fuente de luz IR-cercano ( $\lambda = 850$  nm) (Mengual y col., 1999). El equipo permite hacer varias mediciones a diferentes tiempos, obteniéndose una serie de perfiles de retrodispersión (backscattering) en función del tiempo (Pan y col., 2002)

## 2.5 TURBIDEZ RESIDUAL

Se calculó la densidad óptica ( $D^{500}$ ) de la emulsión con y sin agregado de quitosano a 500 nm usando Espectrómetro UV-VIS 1240 (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japón). El % turbidez residual (TR) se obtiene con la **Ecuación 1**.

$$TR = \frac{D_{\text{sobrenadante}}^{500}}{D_{\text{emulsión}}^{500}} \times 100 \quad (1)$$

donde  $D_{\text{sobrenadante}}^{500}$  es la absorbancia de la emulsión con agregado de quitosano y  $D_{\text{emulsión}}^{500}$  es la absorbancia de la emulsión sin quitosano.

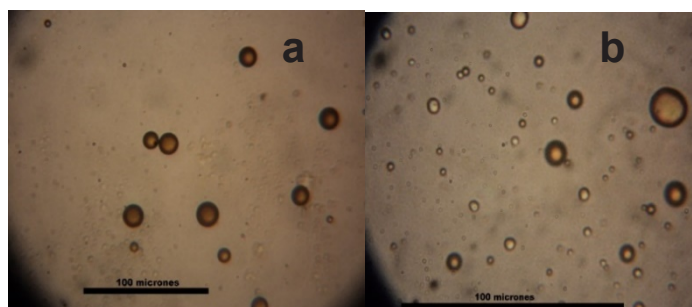
## 2.6 POTENCIAL Z

Se midió el potencial Z de las siguientes soluciones a) emulsión petróleo/agua b) emulsión con agregado de quitosano con dosaje óptimo (máxima clarificación del efluente) y c) emulsión con agregado de quitosano en exceso (sobredosificación) utilizando un equipo Zeta Potential Analyzer 90Plus/Bi-MAS (Brookhaven Instruments Corporation, Holtsville, NY, USA). La medida del potencial Z consiste en determinar la carga en la superficie externa del coloide (Capa Stern, basándose en la teoría de la doble capa eléctrica). El potencial zeta permite conocer el comportamiento del coloide (movilidad electroforética) durante diferentes condiciones del proceso (pH, concentración y tipo de sales).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE PARTÍCULAS Y DQO DE LA EMULSIÓN FORMADA

Teniendo en cuenta las características para la elaboración de la emulsión (O/W) en la **Fig.1 a** y **b** se muestra las micrografías obtenidas de la emulsión petróleo/agua estable. El diámetro promedio de la partícula dependiente del volumen ( $D_{[4,3]}$ ) fue de 13.13 (0.07)  $\mu\text{m}$ , los valores entre paréntesis corresponden a la desviación estándar. Para la emulsión O/W con SDS se obtuvo una DQO de 6442 (399) mg/L, los valores entre paréntesis corresponden a la desviación estándar. El DQO de la emulsión estable (O/W) no cumple con la normativa de la autoridad nacional del agua ya que la resolución 336/2003 establece que la DQO para la descarga de efluentes en conductos pluviales y cuerpos de agua superficiales debe ser  $\leq 250$  mg/L y en mar abierto  $\leq 500$  mg/L, por lo tanto establecer una estrategia para la reducción de la DQO es importante.

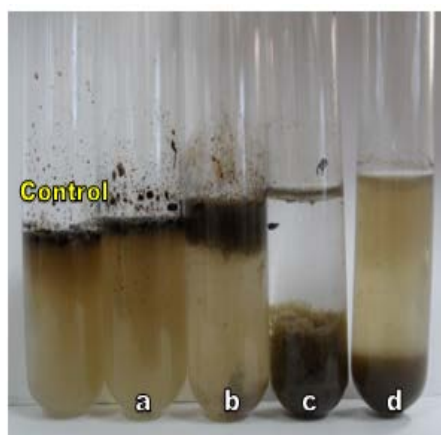


**Fig. 1** Micrografías obtenidas de la emulsión estable O/W (Petróleo/agua) obtenidas con Ultra turrax T-25 a velocidad de  $13500 \text{ min}^{-1}$  durante 5 minutos, las dos imágenes muestran las gotas de la fase oleosa (petróleo) a diferentes aumentos; a) 200 x b) 400x

### 3.2 DESESTABILIZACIÓN DE LOS EFLUENTES EMULSIONADOS POR ADICIÓN DE QUITOSANO

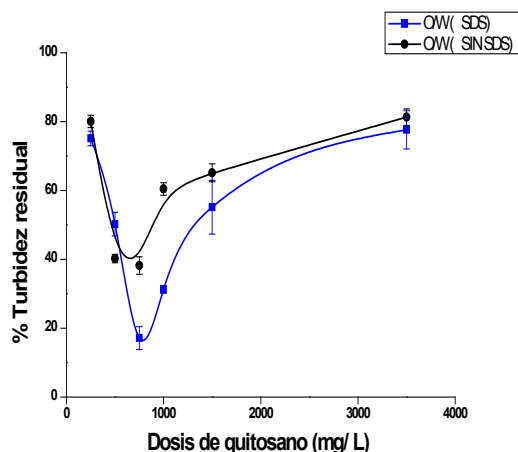
En todos los casos el agregado de quitosano generó una desestabilización de la emulsión que se inició prácticamente de manera instantánea requiriendo un tiempo mínimo de 3 horas para alcanzar una separación/sedimentación completa de la fase acuosa y oleosa. En la **Fig. 2** se muestra la acción clarificante del quitosano en emulsiones estabilizadas con SDS. Se comparó un control (emulsión sin quitosano) con varias emulsiones donde se fue incrementando la dosis de quitosano observando su acción como coagulante después de 5 horas de tratamiento. La emulsión desestabilizada genera un flóculo que posteriormente sedimenta. Si la dosis es la óptima (**Fig. 2c**) se distingue una interfase que separa la zona acuosa clarificada y el flóculo oleoso que sedimenta. Esto ocurre debido a la aglomeración de las gotas por mecanismos de neutralización de carga superficial correspondiente a la interacción del tensioactivo aniónico (SDS) con el quitosano. Por otro lado si la dosis de quitosano es insuficiente (**Fig. 2a-b**) la formación del fenómeno de coagulación es incompleto debido a que la cantidad de cargas positivas aportadas por el quitosano son insuficientes para neutralizar las moléculas iónicas del SDS cargadas negativamente que estabilizan la emulsión.

En la **Fig. 2d** se observa el efecto de la sobredosificación de quitosano; en la fase acuosa superior existe una región turbia en comparación con la **Fig. 2c**, además del precipitado negro. En este caso aunque exista una desestabilización de la emulsión con el consiguiente precipitado un aumento excesivo de quitosano puede generar una repulsión entre micelas positivas provocando una parcial re-estabilización de las partículas O/W. Este efecto es no deseable (Pinotti y col., 2001; Rodríguez y col., 2002) por ello es necesario detectar la dosis óptima.



**Fig. 2.** Efecto de las dosis de quitosano después de 5 horas en la desestabilización de las emulsiones petróleo/agua con presencia de SDS; las imágenes mostradas de izquierda a derecha corresponden: Control (emulsión sin quitosano) y emulsiones con diferentes dosis de quitosano: a) 50 mg/L, b) 100mg/L, c) 500mg/L, d) 830mg/L

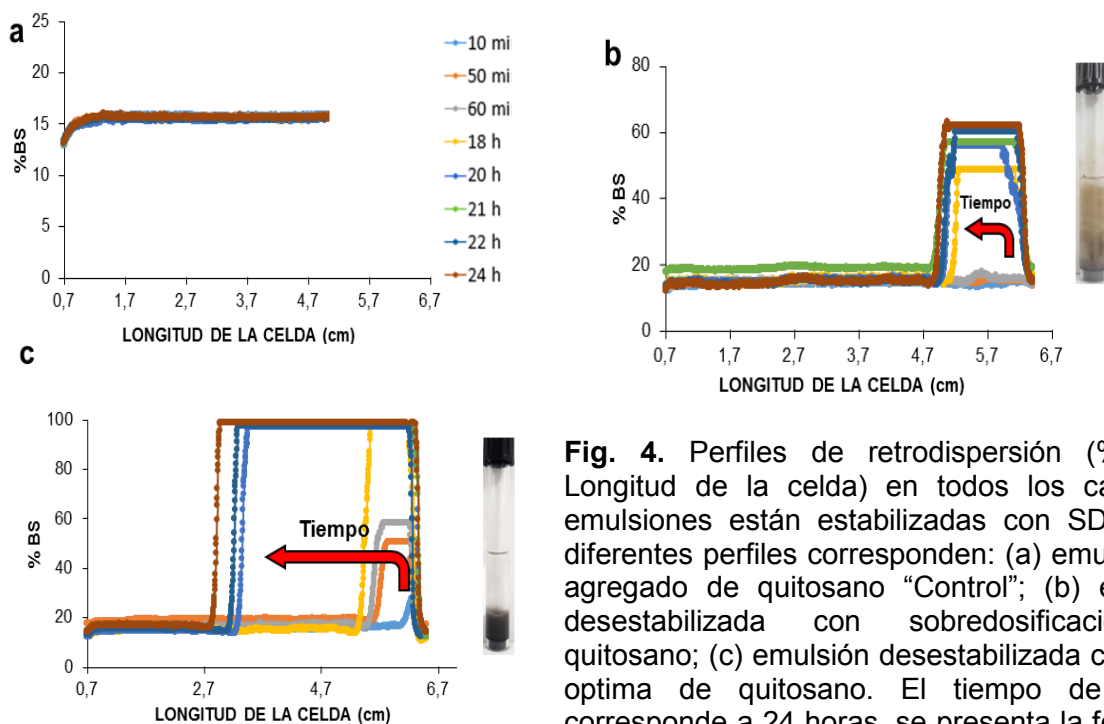
En la **Fig. 3** se muestra el porcentaje de turbidez residual (%TR) en relación al volumen agregado de quitosano. Se puede observar el valor mínimo de la curva correspondiente a una dosis óptima de quitosano agregado (mínimo %TR).



**Fig. 3** Efecto de la dosis agregada de la solución floculante conteniendo quitosano (mg quitosano/ L emulsión) en dos sistemas diferentes, con presencia de SDS (O/W SDS) y sin presencia de SDS (O/W sin SDS). Las barras de error corresponden a la desviación estándar para un  $n=3$

### 3.3 ANÁLISIS DE LA DESESTABILIZACIÓN DE LA EMULSIÓN UTILIZANDO UN MÉTODO ÓPTICO

La evolución de los perfiles del %BS se muestra en la **Fig. 4**. La **Fig. 4a** corresponde a la emulsión sin agregado de quitosano (control) ésta presenta una alta estabilidad global y los perfiles de %BS no varían en la celda durante todo el período de tiempo estudiado. En contraste en las **Fig. 4b** y **c**, que corresponden a emulsiones con SDS desestabilizadas por el agregado de quitosano, el %BS presenta un salto en la interfase flóculo oleoso y zona clarificada, siendo esta zona una interfase móvil que se aproxima a la zona inferior del tubo a medida que transcurre el proceso de floculación y posterior sedimentación. En el caso de utilizar quitosano en exceso en la **Fig. 4b** se observa el mismo fenómeno pero con mucha menor intensidad y menor clarificación (menor valor de BS%).



**Fig. 4.** Perfiles de retrodispersión (%BS vs Longitud de la celda) en todos los casos las emulsiones están estabilizadas con SDS. Los diferentes perfiles corresponden: (a) emulsión sin agregado de quitosano "Control"; (b) emulsión desestabilizada con sobredosis de quitosano; (c) emulsión desestabilizada con dosis óptima de quitosano. El tiempo de lectura corresponde a 24 horas, se presenta la foto de la muestra al finalizar la lectura



### 3.4 POTENCIAL Z

Se obtuvo el potencial Z de la emulsión estable sin agregado de quitosano y del sobrenadante (región clarificada) producto de la desestabilización a dos dosis diferentes (dosis óptima y mayor que la óptima). En el caso de la emulsión estable original (sin agregado de quitosano) el potencial resultante fue de -85.35 (1,59) mV (en paréntesis desviación estándar), esto se debe a la presencia del surfactante iónico usado para estabilizar la emulsión. Cabe señalar que un valor absoluto alto de potencial Z indica que la emulsión es estable debido a la repulsión entre las gotas cargadas eléctricamente .

Una vez que se agregó quitosano para desestabilizar la emulsión el potencial Z para la región clarificada disminuyó en valor absoluto siendo de -0.3 (0.2) mV lo cual indica la neutralización de cargas del sistema. Por otra parte el potencial Z de la emulsión con exceso de quitosano cambió de signo resultando positivo (21.09 (0.35) mV), debido a la parcial reestabilización de la emulsión causada por la repulsión entre cargas positivas.

### 4. CONCLUSIONES

Se logró comprobar la acción del quitosano como coagulante/floculante en sistemas emulsionados con presencia de petróleo determinando cual es la dosis adecuada para alcanzar una fase acuosa final con un mínimo de turbidez. El quitosano al ser un biopolímero con propiedades de polielectrolito catiónico tiene un alto poder de acción para generar una separación de fases óptima. Cabe señalar que la clarificación de la fase acuosa se logra en tiempos mínimos de contacto de quitosano con el efluente del orden de 3 horas permitiendo que se cumpla con los requerimientos para el vertido en cuerpos de agua adyacentes a la refinera. Asimismo es importante recalcar que este biopolímero es compatible con el medio ambiente y proviene de subproductos residuales de la industria pesquera Argentina, por lo tanto su uso resulta en una alternativa sustentable.

### BIBLIOGRAFÍA

- Jayakumar, R., Nwe, N., Tokura, S., y Tamura, H. (2007). Sulfated chitin and chitosan as novel biomaterials. *International Journal of Biological Macromolecules*, 40(3), 175-181.
- Mengual O, Meunier G, Cayré I, Puech K y Snabre P (1999). Turbiscan MA 2000: multiple light scattering measurement for concentrated emulsion and suspension instability analysis. *Talanta*, 50 (2),445-456.
- Pan, L. G., Tomás, M. C., y Añón, M. C. (2002). Effect of sunflower lecithins on the stability of water-in-oil and oil-in-water emulsions. *Journal of surfactants and detergents*, 5(2), 135-143.
- Pinotti, A., Bevilacqua, A., y Zaritzky, N. (2001). Comparison of the performance of chitosan and a cationic polyacrylamide as flocculants of emulsion systems. *Journal of Surfactants and Detergents*, 4(1), 57-63.
- Rodríguez, M. S., Albertengo, L. A., y Agulló, E. (2002). Emulsification capacity of chitosan. *Carbohydrate polymers*, 48(3), 271-276.
- Singer, M. M., y Tjeerdema, R. S. (1993). Fate and effects of the surfactant sodium dodecyl sulfate. *Reviews of environmental contamination and toxicology* (pp. 95-149). Springer New York.

## SÍNTESIS DE MICROESFERAS DE QUITOSANO PARA ENCAPSULAR Y LIBERAR FERTILIZANTE

Jimena Dima (1,2), Cynthia Sequeiros (1), Noemi Zaritzky(1,3)

<sup>(1)</sup> Centro para el estudio de Sistemas Marinos (CCT CECIMAR -GENPAT-CONICET). Puerto Madryn, Chubut, Argentina. <sup>(2)</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA -CONICET- UNLP). Calle 47 y 116 La Plata (1900) Argentina; <sup>(3)</sup> Depto de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de La Plata. Argentina.  
zaritzkynoemi@gmail.com, jimenaabdima@gmail.com

### RESUMEN

La urea es un fertilizante que constituye una importante fuente de nitrógeno para los cultivos. Sin embargo no es tan estable como otros fertilizantes nitrogenados sólidos y se descompone a temperatura ambiente, en particular en una atmósfera húmeda, liberando amoníaco y dióxido de carbono lo que provoca pérdidas del fertilizante contribuyendo a la contaminación ambiental. En el presente trabajo se sintetizaron microesferas de quitosano (obtenido de los exosqueletos de crustáceos de descartes pesqueros) con el fin de encapsular urea y evaluar la liberación de la misma en contacto con agua durante diferentes períodos de tiempo. Para ello, se preparó una solución de quitosano 1% en ácido acético. Por goteo se adicionó dicha solución, a una solución de: i) TPP/Urea a diferentes concentraciones de la misma (1, 2 y 3%) y ii) NaOH 1% en etanol al 26% con iguales concentraciones de urea. Las esferas sintetizadas con QS-NaOH /urea, resultaron geles mas estables y con mayor rendimiento de encapsulación. Asimismo, en el caso en que se utilizó NaOH para la síntesis de esferas de QS el valor de nitrógeno ureico disminuyó en un 39,5,% en las primeras 6 h, manteniéndose estables durante 48h.

### INTRODUCCION

#### Quitosano y la situación regional

Las ciudades de Puerto Madryn y Rawson de la provincia del Chubut, (Patagonia-Argentina), representan unas de las principales ciudades de desembarcos y procesamiento de crustáceos. En los últimos 6 años las capturas de crustáceos, especialmente langostinos, se vienen incrementando ampliamente (Minagri, 2015) alcanzando solo en los puertos de Madryn y Rawson 70000tn/año en el año 2014-2015; a estas especies deben sumarse la pesca de centolla (menos importante), y los cangrejos industrializados incipientemente por las flotas artesanales de estas ciudades, pero que representan varias toneladas anuales.

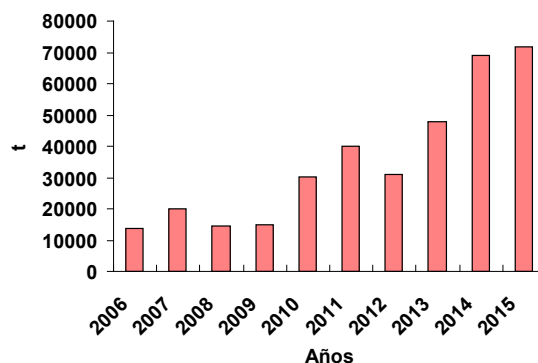


Figura 1. Desembarcos de Langostinos toneladas/año ciudades de Puerto Madryn y Rawson

Durante el procesamiento de estas especies, para la extracción del músculo comestible se generan sólidos de difícil disposición (exosqueletos), característicos de todos los crustáceos. Estos exosqueletos se acumulan actualmente en basurales constituyendo un verdadero contaminante de negativo impacto ambiental para la región. Es así que el problema de la generación de desechos industriales producidos por las industrias pesqueras, han contribuido a incrementar el interés por la búsqueda de opciones de reducción y de aprovechamiento de dichos residuos, adquiriendo mayor relevancia la incorporación de procesos de gestión ambiental. El exoesqueleto residual de la remoción de carne y vísceras, representa entre un 35% y 50% del peso total individuo (Dima, 2013). Sin embargo, estos exoesqueletos tienen una composición rica en componentes de gran importancia como la quitina (segundo polisacárido más abundante después de la celulosa). La quitina contenida en esta biomasa desechable es un componente clave ya que a partir del procesamiento de la misma se obtienen derivados de gran importancia como el quitosano.

El quitosano (QS) es un polisacárido lineal y se prepara por desacetilación de los grupos acetamida de la quitina. Está formado por cadenas de  $\beta$ -(1-4) D-glucosamina (unidades desacetiladas) y N-acetil-D-glucosamina (unidad acetilada). Es un biopolímero de gran interés debido a sus múltiples aplicaciones en las áreas de alimentos, farmacéutica, de tratamiento de aguas, medicina etc. El QS es biocompatible, biodegradable, no tóxico. Su principal diferencia con la quitina es la presencia de grupos amino (-NH<sub>2</sub>) que le confieren un carácter de polielectrolito catiónico natural en medio ácido con importantes implicaciones tecnológicas (Rinaudo, 2006). Debido a estas propiedades únicas, es considerado como un polímero versátil que puede presentarse en diferentes formas, en escamas, polvo, como geles, films, nano/micro partículas, etc. y usarse en numerosas aplicaciones en varios campos como la industria de los alimentos, industria farmacéutica, biotecnología, agricultura, etc.

### Uso de matrices de quitosano para la liberación controlada de fertilizantes

El nitrógeno es una de las fuentes de nutrición vegetal más ampliamente utilizadas a nivel mundial, es por ello que el desarrollo de nuevas tecnologías, tiende a buscar formas de mejorar la eficiencia en su utilización. Un cultivo deficiente en nitrógeno no puede hacer un óptimo uso de la luz solar, por lo que se ve afectada la capacidad de aprovechamiento y absorción de nutrientes, limitando su crecimiento y desarrollo adecuado. Un fertilizante sintético que constituye una importante fuente de nitrógeno para los cultivos es la urea (carbonildiamida); es un fertilizante químico de origen orgánico y su estructura química corresponde a una carbamida (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>C=O. Entre los fertilizantes sólidos, constituye la fuente nitrogenada de mayor concentración (46%). El costo de producción de urea es relativamente bajo y es un producto estable y sin riesgos durante su almacenamiento. Por otra parte la urea es muy soluble en agua y es higroscópica; no es tan estable como otros fertilizantes nitrogenados sólidos. Se descompone incluso a temperatura ambiente, en particular en una atmósfera húmeda, liberando amoníaco y dióxido de carbono. Esto provoca pérdidas graves del fertilizante. Cuando la urea se aplica al suelo, rápidamente se hidroliza a amoníaco en una reacción catalizada por la enzima ureasa. Cuanto más rápido se produce la hidrólisis de urea, más alta es la concentración de NH<sub>3</sub> el cual puede perderse en la atmósfera. El NH<sub>3</sub> se convierte parcialmente en amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) y ambos pueden provocar daños en las semillas en germinación. Por otro lado, una alta proporción del fertilizante aplicado se pierde contribuyendo a una contaminación ambiental severa, que incluye degradación de los suelos y de las fuentes de agua, eutrofización de los ecosistemas marítimos, aumento de la concentración global del gas de efecto invernadero, así como acidificación de los suelos (Hamid *et al.*, 2013 Aguilar Ráquira, 2014).

Se han investigado a nivel internacional diversas estrategias para la obtención de fertilizantes de nitrógeno estabilizados. En los últimos años, los productos de

liberación controlada de sustancias activas han cobrado especial interés en el campo de los agroquímicos. Hoy en día, la aplicación de estos productos en el área agrícola, se está diversificando, siendo utilizada en fertilizantes, pesticidas, insecticidas, entre otros (Palma *et al.*, 2005, Velásquez, 2008). La liberación controlada permite proporcionar la cantidad de fertilizante correcta, en el lugar adecuado y durante el tiempo conveniente. Además minimiza, y en algunos casos evita que se alcancen concentraciones que pueden resultar tóxicas para las plantas (Palma *et al.*, 2005 Velásquez, 2008). Todo esto va acompañado de una disminución del daño ambiental al evitar altas dosis de los mismos. Los sistemas de liberación controlada utilizando biopolímeros como recubrimiento o en matrices reticuladas, son un importante campo de investigación a nivel internacional debido a que son ambientalmente amigables (Azeem *et al.*, 2014). Las microesferas y microcápsulas de quitosano pueden constituirse en un sistema de liberación controlada adecuado para fertilizantes nitrogenados. El uso de sistemas micro/nanoparticulados permite el transporte de sustancias químicas a lugares específicos de acción, el incremento de su vida media y su liberación controlada en el tiempo. La liberación controlada de sistemas particulados a base de QS depende de la densidad de la matriz polimérica, así mediante la variación de la concentración del mismo y su peso molecular, e incorporando copolímeros y agentes entrecruzantes se pueden obtener sistemas de encapsulación con un perfil de liberación adecuadas para cada caso (Tadros, 2009; Trenkel, 2010). En este sentido, la liberación sostenida en el tiempo de fertilizante, es una de las metas a lograr en la agricultura debido a que ésta puede permitir tomar el control de varios problemas.

El objetivo del presente trabajo es realizar una primera evaluación de la eficiencia de las matrices de quitosano en la encapsulación de urea

## METODOLOGÍA

**Obtención de quitosano:** El mismo se sintetizó a partir de descartes de exosqueletos de langostinos según Dima y col, 2015. Para la obtención de quitina los exosqueletos molidos fueron despigmentados, descalcificados y desproteinizados. Para la obtención de quitosano la quitina fue desacetilada con NaOH al 50% a 120°C. Asimismo se caracterizó según su grado de desacetilación (método potenciométrico y espectroscopía infrarroja (FTIR) y el peso molecular por viscosimetría capilar según la ecuación de Mark-Houwink.

### Síntesis de Microesferas de quitosano (QS)

**Sistema A que utiliza urea disuelta en QS:** Se preparó una solución de quitosano al 1% en ácido acético (pH= 4,3), a la cual se le agregaron diferentes concentraciones de urea (1; 1,5 y 2%). Por medio de una jeringa, se agregó gota a gota la solución de QS/urea a una solución de: **i)** TPP (1%) o **ii)** NaOH-etanol (1N).

**Sistema B que utiliza urea en solución:** Se preparó una solución de quitosano 1% en ácido acético (pH = 4,3) sin agregado de urea. Por medio de una jeringa se adicionó dicha solución, gota a gota, a una solución de: **I)** TPP/Urea a diferentes concentraciones de la misma (1, 2 y 3%) y **II)** NaOH 1% en etanol al 26% con iguales concentraciones de urea. En todos los casos se agregaron 2 ml de la solución conteniendo QS a 20 ml de solución receptora, bajo agitación suave a temperatura ambiente. Al entrar en contacto el QS con la solución se formaron microesferas. Éstas se filtraron, enjuagaron con agua destilada y se liofilizaron (Fig 2).

En ambos sistemas se sintetizaron esferas que no contenían urea las cuales se consideraron como controles. La concentración de nitrógeno en las microesferas se determinó utilizando un analizador elemental de C y N (CHN628 Series Elemental Analysis LECO). La concentración de urea encapsulada en las microesferas se

expresó como gramos de Urea por g de QS (gU/gQS). Asimismo, se realizaron observaciones por Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

**Estudios de liberación de Urea en el tiempo:** Una vez liofilizadas las cápsulas y cuantificado el valor inicial de urea, se realizó un estudio de liberación de la misma en agua a lo largo del tiempo. Para ambos métodos de síntesis, las microesferas liofilizadas se colocaron en 20 ml de agua destilada. A diferentes tiempos de contacto (3, 6, 12, 24, 48 y 72h) las esferas se recolectaron, se midieron sus tamaño (grado de hinchamiento) y contenido de Nitrógeno (Fig 2).



Figura 2 a) Microesferas de QS en TPP, b) Microesferas de QS-TPP liofilizadas, c) Microesferas de QS-TPP liofilizadas y rehidratadas 6 h en agua

## RESULTADOS

### Obtención y caracterización de Quitina y Quitosano

La quitina extraída de exoesqueletos de langostinos triturados, descarbonatados y desproteinizados resultó del 22.8%. El quitosano obtenido luego de la desacetilación fue de un 78.8% de la quitina inicial; los valores de rendimiento pueden variar según la época del año, estado de la materia prima, especie, tamaño, entre otras variables características de los exoesqueletos de crustáceos. El peso molecular era de  $1.46 \times 10^5$  Da y el grado de desacetilación mayor al 88% (Dima y col, 2015).

### Efectividad de las Microesferas de quitosano para la encapsulación de urea:

En el Sistema A en el cual se utilizó urea disuelta en quitosano, la mejor eficiencia de encapsulación se observó para las esferas de QS/urea al 2% en solución de NaOH, con un valor de 0,051g U/gQS.

Para el Sistema B (I y II) en el que la urea no se hallaba disuelta en la solución de QS se observó que la eficiencia de encapsulación se incrementó con el aumento de la concentración de urea en la solución. La misma fue más alta que en el sistema A, y varió de 0,10 a 0,30 gU/gQS para la matriz de QS-TPP/urea (I) y de 0,29 a 0,82 gU/gQS para la matriz de QS-NaOH/urea (II) cuando se usaron concentraciones de urea entre 1 y 3% (Fig 3).

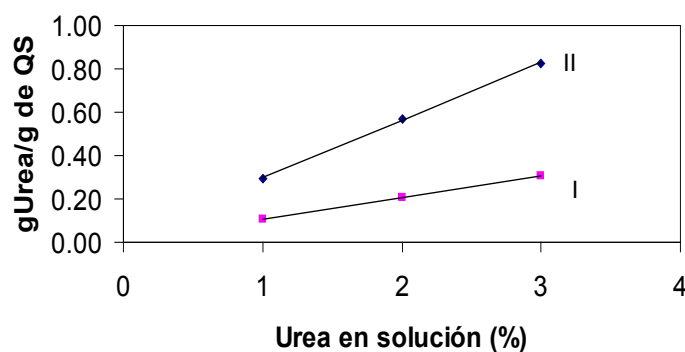


Figura 3. Encapsulación de urea en quitosano (gUrea/g de QS) en función de la concentración de urea inicial en la solución receptora: Sistema B (I) QS-TPP/urea y Sistema B (II) QS -NaOH/Urea.



En todos los casos el diámetro de la esfera formada fue de 2 mm. Una vez liofilizadas, las microesferas disminuyeron su tamaño en un 72%. Las esferas formadas con TPP (Sistema B (I)) resultaron menos estables, menos homogéneas y de fácil rotura. La menor eficiencia de encapsulación de nitrógeno en la matriz con TPP podría deberse a una competencia entre el TPP (con carga negativa) y la urea por los grupos positivos del QS.

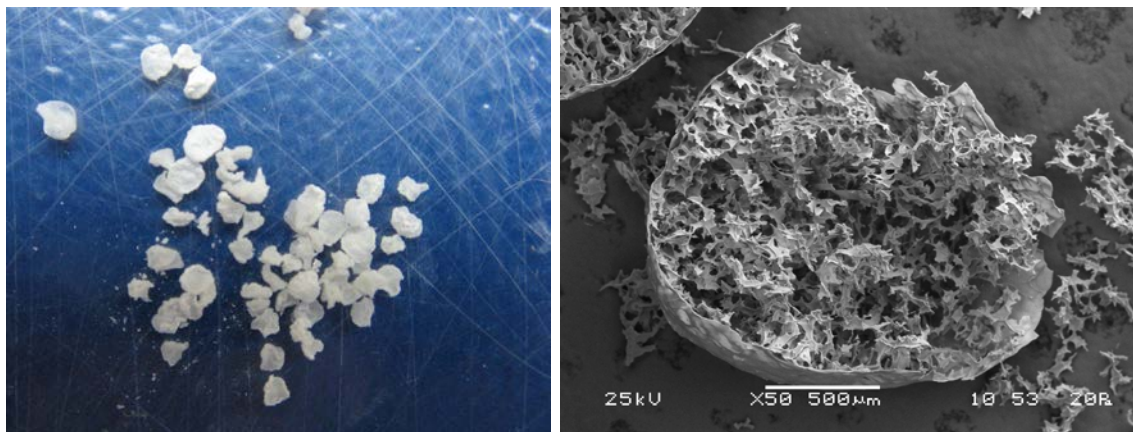


Figura 4. Sistema B (I): A) Microesferas de TPP liofilizadas. B) Micrografía SEM de la parte interna de las microesferas de QS en TPP.

#### Liberación de urea en agua

El sistema B con mayor eficiencia de encapsulación fue seleccionado para realizar el ensayo de liberación de nitrógeno a partir de urea. En el caso en que se utilizaron microesferas sintetizadas por medio de QS-TPP/urea (sistema B (I)), el valor de nitrógeno ureico disminuyó en un 55,6% (con respecto al valor inicial) en las primeras 6h y un 75% a las 48h de contacto con el agua. En el caso en que se utilizó el sistema B (II), QS-NaOH/urea, el valor de nitrógeno ureico disminuyó en un 39,5% en las primeras 6 h, manteniéndose estables durante 48h (Fig 5), lo cual puede atribuirse a la mayor estabilidad de los geles.

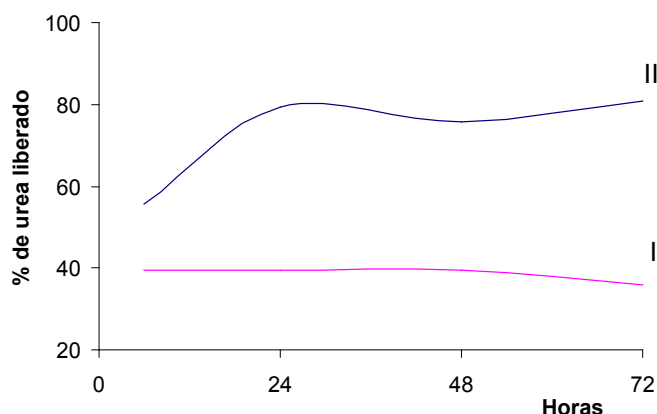


Figura 5. Porcentaje de urea liberada en agua en función del tiempo en los sistemas: Sistema B (I) QS/ Urea-TPP y Sistema B (II) QS/Urea-NaOH

## CONCLUSIONES

El sistema A (urea disuelta en quitosano) resultó en una muy baja eficiencia de encapsulación. Esta eficiencia se incrementó cuando se disolvió la urea en la solución receptora (TPP o NaOH) correspondientes a los sistemas B (I) y (II), respectivamente. Si bien, el quitosano resultó efectivo en la encapsulación de urea, la eficiencia varió considerablemente según la concentración inicial del material nitrogenado y las combinaciones y soluciones elegidas para la síntesis de las microesferas, obteniéndose geles de variada estabilidad.

El presente trabajo, aporta un estudio preliminar del uso del QS en la elaboración de matrices de liberación controlada de urea. Un estudio profundo de estas temáticas permitirá por un lado realizar aportes en el área de la obtención de productos en base a quitosano a partir de materiales actualmente descartados por las industrias pesqueras, y por otro, contribuir al desarrollo de tecnologías ligadas a la protección del medio ambiente, en este caso a la mejora de los suelos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar Ráquira, I. (2014). Preparación y evaluación en suelo de fertilizantes de liberación controlada cubiertos con polímeros biodegradables. Tesis Magíster en Ciencias Químicas Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias, Departamento de Química Bogotá D.C., Colombia
- Azeem, B., KuShaari, K., Man, Z. B., Basit, A., & Thanh, T. H. (2014). Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. *Journal of Controlled Release*, 181, 11-21.
- Dima, Jimena, Sequeiros C, Zaritzky N, (2015). Hexavalent chromium removal in contaminated water using reticulated chitosan micro/ nanoparticles from seafood processing wastes *Chemosphere* 141, 100 - 111
- Dima, J.B. (2013). Tesis Doctoral. "Procesamiento integral de las especies patagónicas de cangrejos marinos de valor comercial *Ovalipes trimaculatus* y *Platyxanthus patagonicus*".
- Hamid, N. N. A., Mohamad, N., Hing, L. Y., Dimin, M. F., Azam, M. A., Hassan, M. H. C., & Ahmad, A. S. (2013). The effect of chitosan content to physical and degradation properties of biodegradable urea fertilizer. *Journal of Scientific and Innovative Research*, 2(5), 893-902.
- Ministerio de Agroindustrias de la Nación (Minagri, 2015). [www.minagri.gob.ar](http://www.minagri.gob.ar) / [www.agroindustria.gob.ar](http://www.agroindustria.gob.ar)
- Palma, G., Casals, P., & Cardenas, G. (2005). Synthesis and characterization of new chitosan-O-ethyl phosphonate. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 50(4), 719-724.
- Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 31(7), 603-632.
- Tadros, T.F. (2009) Controlled-release Formulations. En: Colloids in Agrochemicals, Colloids and Interface Science Series: Vol. 5, WILEY-VCH. Chapter 12, pp. 235-245.
- Trenkel, M.E. (2010) Slow- and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture. International Fertilizer Industry Association (IFA). Paris, France
- Velásquez, C.L. (2008) Algunas potencialidades de la quitina y el quitosano para usos relacionados con la agricultura en Latinoamérica. *Revista UDO Agrícola*, 8(1), 1-22.

## REMOCIÓN DE NITRÓGENO MEDIANTE NITRIFICACIÓN Y DESNITRIFICACIÓN AERÓBICA UTILIZANDO UN REACTOR BIOLÓGICO SECUENCIAL (SBR)

**Juan C. Alzate Marin<sup>1</sup>, Alejandro H. Caravelli<sup>1</sup>, Noemí E. Zaritzky<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), CCT – La Plata – CONICET, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP, Comisión de Investigaciones Científicas (CIC), Pcia. Bs. As. 47 y 116 (B1900AJJ) La Plata, Argentina. Tel.: 0221-425-4853. <sup>2</sup> Facultad de Ingeniería, UNLP, 48 y 115 (B1900AJJ) La Plata, Argentina. E-mail: ing.juankal@yahoo.es (Alzate Marin J.C.).

### INTRODUCCIÓN

El nitrógeno (N) es uno de los elementos claves que aceleran la eutrofización del agua (Xu y col., 2013); por lo tanto su remoción es de vital importancia. La remoción biológica de nitrógeno (RBN) implica dos procesos. En la primera etapa conocida como nitrificación se convierte el amoníaco a nitrato reduciendo la demanda de oxígeno del efluente; no obstante, en este paso el N no se elimina. En la segunda etapa, conocida como desnitrificación, el nitrato es convertido en un producto gaseoso que puede ser óxido nitroso ( $N_2O$ , desnitrificación parcial) o nitrógeno gaseoso ( $N_2$ , desnitrificación completa), los cuales son eliminados a la atmósfera. La RBN constituye el método más apropiado para la eliminación del nitrógeno ya que presenta una elevada eficacia, alta estabilidad y fiabilidad, fácil control del proceso, bajas necesidades de espacio y es económicamente rentable (Ahn, 2006). La nitrificación consiste en la oxidación biológica del amoníaco ( $NH_3$ ), primero a nitrito ( $NO_2^-$ ) y luego a nitrato ( $NO_3^-$ ) realizada por las bacterias nitrificantes autótrofas. El amoníaco se oxida tanto en presencia como en ausencia de oxígeno, pero la formación de nitrato requiere oxígeno; si predominan condiciones reductoras, la formación del nitrato se dificulta. En el proceso de nitrificación intervienen dos grupos de bacterias: bacterias oxidantes de amonio (BOA) y bacterias oxidantes de nitrito (BON), que usan amoníaco o nitrito como fuente de energía respectivamente, oxígeno molecular como último aceptor de electrones y dióxido de carbono como fuente de carbono (Ahn, 2006). La desnitrificación (DN) ocurre generalmente bajo condiciones anóxicas, por acción de bacterias heterótrofas facultativas que reducen el nitrato hasta nitrógeno molecular, esta reacción ocurre en etapas apareciendo como productos intermedios nitrito, óxido nítrico y óxido nitroso. Las bacterias desnitrificantes utilizan el carbono orgánico para la síntesis celular y fuente de energía y el nitrato como último aceptor de electrones. La DN se produce casi exclusivamente bajo condiciones anaeróbicas facultativas o microaerófilas. Sin embargo, la DN completa puede lograrse bajo alta concentración de oxígeno disuelto (COD). La desnitrificación aeróbica (DNA) puede ofrecer varias ventajas, ya que se produce en reactores aireados (Ahn, 2006).

Los procesos RBN más comunes son: (a) Sistema anóxico/aeróbico (AN/AE): conformado por dos reactores en serie caracterizándose porque la zona anóxica se encuentra antes de la aeróbica. En el primer reactor se realiza la desnitrificación empleando la fuente de carbono (C) orgánico presente en el agua residual y en el tanque aeróbico, el amonio es oxidado a nitrato siendo necesario recircular el licor mixto rico en nitratos al tanque anóxico para su desnitrificación. Este proceso presenta varias desventajas como son los altos costos en la recirculación y la producción de óxido de nitrógeno como producto final en lugar de  $N_2$  debido a las condiciones microaerófilas generadas por la recirculación. (b) Sistema aeróbico/anóxico (AE/AN): el tanque aeróbico se encuentra al inicio del proceso realizándose allí la nitrificación y consumo del C orgánico; luego se encuentra el tanque anóxico donde se realiza la desnitrificación, siendo necesario la adición de una fuente de C exógena. La post-desnitrificación puede ser impulsada, entre otros microorganismos, por organismos acumuladores de glucógeno (GAOs) o acumuladores de polifosfato (PAOs), que

almacenan polihidroxicanoatos (PHAs) y glucógeno como fuente de C intracelular y tienen la capacidad de desnitrificar utilizando dichos compuestos como fuente de carbono y energía, denominándose GAOs desnitrificantes (DGAO) y PAOs desnitrificantes (DPAO). Los PAOs son responsables de la eliminación biológica de fósforo (EBPR). Algunas de las desventajas del sistema AE/AN están dadas por las condiciones microaerófilas generadas a partir de la transferencia de oxígeno mediante la mezcla en el reactor anóxico, lo cual puede inhibir la tasa de desnitrificación (Plósz y col., 2003).

## OBJETIVO

En el presente trabajo se propone como objetivo evaluar la factibilidad de lograr un sistema de remoción de nitrógeno, basado en dos fases de reacción: anóxica/aeróbica (AN/AE), con el propósito de lograr el proceso de desnitrificación en la fase aeróbica con COD superior a 1,0 mg/L, sin el requerimiento de recirculación del licor mixto y sin pulsos de fuente de carbono. Para ello se utiliza un reactor de cargas secuenciales (SBR) alimentado con acetato como fuente de C y energía y sulfato de amonio como fuente de N. Se estudian además los efectos de los siguientes parámetros de operación: duración del ciclo, relación temporal AN/AE, pH, COD y relación demanda química de oxígeno/nitrógeno (DQO/N).

## METODOLOGÍA

Se empleó un SBR (1,2 L) que fue operado durante 2 años con sucesivos ciclos que comprenden las siguientes fases: anóxica y aeróbica como etapas de reacción, sedimentación de la biomasa y purga final del sobrenadante. Durante la fase anóxica, se mezcló el reactor (100 rpm). En la fase aeróbica se suministró aire y la velocidad de agitación se controló automáticamente a fin de mantener la concentración de oxígeno deseada. El reactor se alimentaba al inicio de la fase anóxica. El reactor, desarrollado en el Laboratorio de Electrónica del CIDCA, cuenta con un módulo de control automático encargado de mantener constante la temperatura, pH y COD, regular la velocidad de agitación, llenado, vaciado y purga del reactor así como la duración de las diferentes fases.

Durante la operación del reactor se mantuvo constante la temperatura ( $25 \pm 0,5$  °C). El pH se controló de manera automática, durante las fases anóxica y aeróbica, mediante la dosificación de soluciones de hidróxido de sodio y ácido sulfúrico. El aire se introdujo a través de difusores porosos situados en el interior del reactor. La COD se midió mediante un electrodo y se expresó como porcentaje del nivel de saturación de oxígeno. El coeficiente de transferencia volumétrica de oxígeno ( $K_L a$ ,  $h^{-1}$ ) se midió por el método de sulfito con agua (Al-Ahmady, 2006). El  $K_L a$  se obtuvo por la integración de la siguiente ecuación:

$$TTO = \frac{dCOD}{dt} = k_L a (COD^* - COD) \quad (1)$$

donde TTO es la tasa de transferencia de oxígeno ( $mgO_2/(Lh)$ ),  $COD^*$  es la concentración de saturación de oxígeno en el agua ( $mgO_2/L$ ) a la temperatura de trabajo y COD es la concentración de oxígeno disuelto ( $mgO_2/L$ ) en el tiempo (t). La fuerza impulsora del proceso de transferencia de oxígeno está dado por la diferencia entre  $COD^*$  y COD. El  $K_L a$  se midió a una velocidad de agitación de 100 rpm, temperatura estándar (20°C) y diferentes caudales de aireación (0,2-2,3 L/Lmin). Debido a que el SBR fue operado a 25 °C, en lugar de 20°C, se debió hacer una corrección del  $K_L a$  mediante la siguiente estimación (Al-Ahmady, 2006):

$$k_L a_{(25^\circ C)} = k_L a_{(20^\circ C)} 1.024^{(25-20)} \quad (2)$$

En presencia de microorganismos, la velocidad de consumo de oxígeno ( $VCO$ ,  $mgO_2/(L h)$ ) se determina por la siguiente expresión:

$$VCO = q_{O_2} X \quad (3)$$

donde  $q_{O_2}$  es la velocidad específica del consumo de oxígeno ( $mgO_2/(mgDQO_B \text{ h})$ ) y  $X$  es la concentración de biomasa ( $mgDQO_B/L$ ).

El balance de masa para COD en presencia de biomasa se puede expresar como:

$$\frac{dCOD}{dt} = TTO - VCO \quad (4)$$

Se utilizó agua residual sintética: acetato como fuente de C y energía y sulfato de amonio como fuente de N. Al final de la fase aeróbica se realizó la purga de lodos resultando un tiempo de residencia celular (TRC) de 10 días para todos los ensayos. El SBR se monitoreó mediante los siguientes parámetros: potencial óxido-reducción (ORP, mV), ortofosfato ( $PO_4^{3-}$ -P, mg/L), amonio ( $NH_3$ -N, mgN/L), nitrito ( $NO_2^-$ -N, mgN/L), nitrato ( $NO_3^-$ -N, mgN/L), sustrato orgánico como DQO soluble ( $DQO_S$ , mg/L) y concentración de biomasa como DQO ( $DQO_B$ , mg/L).  $DQO_B = DQO \text{ total } (DQO_T) - DQO_S$ .

La presencia de gránulos intracelulares de PHA y polifosfato se detectó mediante tinción (Sudan Black y Neisser). Las concentraciones de ortofosfato, N amoniacal, nitrito, nitrato y DQO fueron determinadas por espectrofotometría. Se tomaron muestras del SBR para medir  $DQO_T$ . Otra alícuota se utilizó para la determinación de compuestos solubles (ortofosfato, N amoniacal, nitrito, nitrato y  $DQO_S$ ) luego de la centrifugación y filtración de la muestra. El  $DQO_B$  se determinó a partir de la diferencia entre  $DQO_T$  y  $DQO_S$  y se transformó en sólidos suspendidos volátiles (SSV) utilizando una curva de calibración. El nitrógeno inorgánico (Ni) correspondió a la suma de las concentraciones de amoníaco, nitrito y nitrato.

Se estudiaron 4 condiciones operativas; cada condición se mantuvo al menos 4 tiempos de residencia celular (TRC).

- **Experimentos A y B:** El SBR presentó 4 ciclos/día. La relación temporal AN/AE fue de 1,0/1,0 y el tiempo de sedimentación fue de 45 minutos. El pH se mantuvo en  $7,0 \pm 0,1$  durante las fases de reacción. En la fase aeróbica, la COD se mantuvo entre 0,8 y 2,4  $mgO_2/L$ . El tiempo de residencia hidráulico (TRH) fue de 21,8 hs, la relación DQO:N:P se mantuvo en 100:10:5, la temperatura= 25 °C. Para los experimentos A y B los valores respectivos de la carga orgánica volumétrica fueron 440 y 880  $mgDQO/(L \text{ día})$ , la carga de nitrógeno de 44 y 88 ( $mgNH_3-N/(L \text{ día})$ ), y la de fósforo de 22 y 44  $mgP/(L \text{ día})$ .

- **Experimento C:** El SBR presentó 2 ciclos/día. La relación AN/AE fue= 0,5/1,0. El tiempo de sedimentación de 45 minutos. El pH se mantuvo en  $7,5 \pm 0,1$  durante las fases de reacción. En la fase aeróbica, la COD fue mayor que 4,0  $mgO_2/L$ . El TRH fue de 41,8 hs. La relación DQO:N:P fue de 100:10:5, temperatura= 25 °C, carga orgánica volumétrica= 440  $mgDQO/(L \text{ día})$ , carga de nitrógeno= 44  $mgNH_3-N/(L \text{ día})$  y de fósforo= 22  $mgP/(L \text{ día})$ .

- **Experimento D:** El SBR presentó las mismas condiciones del ensayo C respecto a N° de ciclos/día, relación AN/AE, sedimentación, pH, COD y TRH. La relación DQO:N:P fue= 100:7,5:5. La carga orgánica volumétrica fue 585  $mgDQO/(L \text{ día})$ , la carga de N= 44  $mgNH_3-N/(L \text{ día})$  y de P= 29  $mgP/(L \text{ día})$ . Los factores ambientales mantuvieron el reactor a 30 °C.

El N removido por nitrificación y desnitrificación simultánea (NDS) se calculó en la fase aeróbica a partir de la diferencia entre el N del amonio que fue oxidado ( $NH_3-N_{OXIDADO}$ ) y la suma de las formas de N generado por nitrificación ( $NO_x-N: NO_3^-N + NO_2^-N$ ). El N del amonio que fue oxidado ( $NH_3-N_{OXIDADO}$ ) se calculó a partir de la diferencia entre el consumo total de N amoniacal ( $NH_3-N$ ) y el  $NH_3-N$  que fue asimilado por la biomasa heterótrofa, ambos en la fase aeróbica. El N asimilado por nitrificantes se consideró despreciable. El consumo total de  $NH_3$  se midió por espectrofotometría. El  $NH_3-N$  asimilado por heterótrofos, para el período cuando el  $NH_3$  estaba presente, se estimó a partir de los balances de masas teóricas de C y N utilizándose los coeficientes estequiométricos típicos del sistema biológico estudiado. Para ello se estimaron las cantidades de polihidroxibutirato (PHB) y la biomasa producida en las fases anóxicas y aerobias, respectivamente. El polímero que se forma principalmente cuando se utiliza acetato como fuente de C es el PHB. En la fase anóxica se



estimó la cantidad de PHB que se produce a partir de acetato utilizando un rendimiento  $Y_{\text{PHB/Ac}}$  de 0,52 C-mol PHB/C-mol Ac (0,38 gPHB/gAc) (Beun y col., 2002). El acetato disponible para la producción de PHB se determinó a partir de la diferencia entre los DQOs al inicio de fase anóxica y DQOs necesaria para la DN anóxica con una demanda de acetato teórica de 3,8 mgDQOs/mgNO<sub>3</sub>-N (3,65 mgAc/mgNO<sub>3</sub>-N). La biomasa heterótrofa producida a partir de PHB se calculó suponiendo un  $Y_{\text{X/PHB}}$  de 0,5 C-mol biomasa/C-mol PHB (0,57 gSSV/gPHB). Finalmente, el NH<sub>3</sub>-N asimilado por dicha biomasa se determinó a partir de su fórmula molecular CH<sub>1,8</sub>O<sub>0,5</sub>N<sub>0,2</sub> (24,6 gSSV/C-mol biomasa) (Third y col. 2003).

El nitrógeno removido por NDS, para el período cuando el N amoniacal estaba presente, se calculó como (Third y col. 2003):

$$\% \text{NDS} = \left( 1 - \frac{\text{NO}_x^- - \text{N}}{\text{NH}_3 - \text{N}_{\text{oxidado}}} \right) \times 100 \quad (5)$$

donde NO<sub>x</sub><sup>-</sup>-N es la suma de nitrito y nitrato en el momento una vez agotado el amoníaco y NH<sub>3</sub>-N<sub>oxidado</sub> es la cantidad de nitrógeno amoniacal oxidada durante el período aeróbico.

La cantidad de nitrógeno eliminado a través de desnitrificación (DN), después de la etapa de NDS, se calculó a partir de la diferencia entre las cantidades de N oxidado (NO<sub>x</sub><sup>-</sup>-N) al final de la nitrificación y al final de la fase aeróbica a través de la siguiente ecuación:

$$\% \text{DN} = \left( 1 - \frac{\text{NO}_x^- - \text{N}_{\text{FA}}}{\text{NO}_x^- - \text{N}_{\text{FN}}} \right) \times 100 \quad (6)$$

donde NO<sub>x</sub><sup>-</sup>-N<sub>FA</sub> es la cantidad de nitrógeno oxidado al final de la fase aerobia y NO<sub>x</sub><sup>-</sup>-N<sub>FN</sub> es la cantidad de nitrógeno oxidado en el final de la nitrificación.

La eliminación de nitrógeno inorgánico (Ni) se midió de la siguiente manera:

$$\% \text{NiR} = \left( 1 - \frac{\text{Ni}_t}{\text{Ni}_o} \right) \times 100 \quad (7)$$

donde Ni<sub>o</sub> es la concentración de N inorgánico (Ni, mg/L) del agua residual al inicio de la fase anóxica dado por la concentración de NH<sub>3</sub>-N en dicha fase y Ni<sub>t</sub> corresponde a la suma de las formas de N (NH<sub>3</sub>-N + NO<sub>2</sub>-N + NO<sub>3</sub>-N) a diferentes tiempos del ciclo. Las concentraciones de nitrato y/o nitrito al inicio del ciclo (provenientes del ciclo anterior) no fueron consideradas en la determinación de Ni<sub>o</sub>. La velocidad de nitrificación volumétrica (VNV, mgNH<sub>3</sub>-N/(L h)) se determinó a partir de la pendiente de las curvas de decaimiento de NH<sub>3</sub>-N después de restar el NH<sub>3</sub> asimilado por heterótrofos en el intervalo de tiempo. La velocidad de nitrificación específica (VNE, mgNH<sub>3</sub>-N/(gSSV h)) se calculó a partir de la relación entre VNV y la biomasa. La velocidad de DN volumétrica (VDNV, mgNO<sub>3</sub>-N/(L h)) y la velocidad de DN específica (VDNE, mgNO<sub>3</sub>-N/(gSSV h)) se calcularon a partir de la pendiente de las curvas de decaimiento de nitrato para el período posterior a la fase NDS.

**Análisis estadístico:** Para cada ensayo se analizaron tres ciclos y se presentaron los valores promedios. El análisis de varianza se realizó con nivel de significación de 0,05.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El  $k_L a$  se midió en agua a 20°C, 100 rpm y diferentes velocidades de aireación (VAR: 12, 37, y 137 L/(L h)). Una relación lineal entre el  $k_L a$  y la VAR fue determinada:

$$k_L a = m \text{VAR} + n \quad (8)$$

donde  $m$  es la pendiente (L/L) y  $n$  (h<sup>-1</sup>) corresponde al  $k_L a$  producido por la agitación sin aireación (VAR= 0). Los parámetros  $m$  y  $n$  estimados fueron: 0,10L/L y 2,34 h<sup>-1</sup> respectivamente. Para el agua y las condiciones de trabajo del SBR (25 °C, 100 rpm, sin

aireación) se estimó un valor de  $k_{La}$  de  $2,63 \text{ h}^{-1}$  mediante la ec. (2). Sobre la base de esta estimación, se puede suponer que en un cultivo mixto sometido únicamente a agitación se produce el ingreso de oxígeno a través de la superficie del líquido durante la etapa anóxica de la operación de SBR. El oxígeno aumenta el estado oxidativo de los sistemas biológicos, lo cual podría afectar negativamente a los procesos anaerobios y anóxicos.

El **Experimento A** se llevó a cabo en condiciones de baja aireación y baja carga orgánica. En estado estacionario se alcanzó una concentración de biomasa de  $1251 \pm 187 \text{ mgDQO}_B/\text{L}$ , consumiéndose casi por completo el sustrato orgánico al inicio del proceso. El PHA se acumuló en la fase anóxica y su degradación en fase aeróbica. Durante todo el ciclo, el ORP se mantuvo en valores positivos y la concentración de ortofosfato no mostró cambios significativos, dando negativa la tinción poli-P. En la fase anóxica, la TTO generada por la agitación fue de  $21,3 \text{ mg O}_2/(\text{L h})$  siendo responsable de valores positivos de ORP ( $286 \pm 8 \text{ mV}$ ). En la fase aeróbica se registraron valores de ORP de  $295 \text{ mV}$ , implicando condiciones adecuadas de oxidación para la nitrificación. El  $\text{NH}_3$  se eliminó un 99%, casi exclusivamente en la fase aeróbica. Alrededor del 70% de  $\text{NH}_3$  presente en fase aeróbica fue removido por nitrificación. A pesar de que los valores de COD eran bajos ( $<2,0 \text{ mg O}_2/\text{L}$ ), la nitrificación no se vio afectada con una  $\text{VNV} = 3,96 \text{ mg NH}_3\text{-N}/\text{Lh}$  y  $\text{VNE} = 4,22 \text{ mgNH}_3\text{-N}/(\text{gSSV h})$ , sin acumulación de nitrito. Los porcentajes de NDS y DN fueron bajos (11 y 5 % respectivamente), por lo tanto la velocidad de DN no pudo ser calculada. Mediante balances de N se determinó una descarga media de Ni de  $5,94 \text{ mgN}/\text{día}$ . En el siguiente ciclo, el nitrato residual, que no pudo ser desnitrificado aeróbicamente, fue rápidamente eliminado en la fase anóxica por desnitrificantes. La remoción de Ni fue  $45 \pm 2\%$  (Fig. 1(a)).

El **experimento B** se llevó a cabo en condiciones de baja aireación y alta carga orgánica. La biomasa alcanzada fue  $1850 \pm 120 \text{ mgDQO}_B/\text{L}$ ; la nitrificación fue de 7%. El proceso de DN no fue observado. La descarga media de Ni fue  $57,42 \text{ mgN}/\text{día}$ , resultando una eliminación de 8% (Fig. 1(b)). En sistemas de lodos activados, las bacterias nitrificantes crecen mucho más lentamente que las heterótrofas, lo que genera una competencia por el oxígeno. En el presente experimento, las condiciones de alta carga orgánica y baja COD favorecieron el desarrollo de heterótrofos, los cuales desplazaron a la comunidad nitrificante.

Debido a que en el Experimento B se logró una baja eliminación de Ni, se optó en el **Experimento C** por aumentar la aireación y disminuir la carga orgánica. Se alcanzó una biomasa de  $1125 \pm 66 \text{ mgDQO}_B/\text{L}$ , el sustrato orgánico fue eliminado en la fase anóxica y el ORP se mantuvo en valores positivos. Durante la nitrificación se oxidó el 85% del amoníaco que ingresó en la fase aeróbica y el 15% restante fue asimilado por bacterias heterótrofas. Los valores de  $\text{VNV} = 3,71 \text{ mgNH}_3\text{-N}/(\text{L h})$  y  $\text{VNE} = 4,14 \text{ mgNH}_3\text{-N}/(\text{gSSV h})$  fueron similares al experimento A y alrededor del  $55 \pm 3\%$  del nitrato generado se eliminó por DN ( $\text{VDNV} = 2,53 \text{ mgNO}_3\text{-N}/(\text{Lh})$ ,  $\text{VDNE} = 2,94 \text{ mgNO}_3\text{-N}/(\text{gSSV h})$ ). La descarga media de Ni fue  $3,57 \text{ mgN}/\text{día}$ ; nitrito no fue detectado. En la Fig. 1(c) se puede observar como el proceso DN junto con la asimilación de N heterotrófica condujo a una eliminación de Ni del  $67 \pm 2\%$ .

Se planteó la hipótesis de una posible limitación de fuente de C intracelular para llevar el proceso de DN en fase aeróbica. Por lo tanto, en el **Experimento D** se modificó la relación DQO:N aumentando la concentración de fuente de C, pasando de 100:10 a 100:7,5, manteniéndose las mismas condiciones operativas del experimento C. La biomasa se estabilizó en  $2082 \pm 30 \text{ mgDQO}_B/\text{L}$ . Las condiciones oxidantes fueron similares a las del experimento C. La remoción de  $\text{NH}_3$  fue del 100%; no hubo acumulación de nitrito. Se registraron valores de  $\text{VNE} = 4,1 \text{ mgNH}_3\text{-N}/(\text{gSSV h})$  y  $\text{VNV} = 6,52 \text{ mgNH}_3\text{-N}/(\text{L h})$ . No se desarrolló el proceso SND; el porcentaje de DN fue del  $61 \pm 5\%$  con  $\text{VDNV} = 3,73 \text{ mgNO}_3\text{-N}/(\text{Lh})$  y  $\text{VDNE} = 2,34 \text{ mgNO}_3\text{-N}/(\text{gSSV h})$ . La descarga media de Ni fue  $2,9 \text{ mgN}/\text{día}$  resultando una eliminación de 70% (Fig. 1(d)). La tasa específica de DN fue mucho mayor que los valores típicos para la DN por decaimiento endógeno, la cual varía entre 0,2 a 0,6  $\text{mgNO}_3\text{-N}/(\text{gSSV h})$ . La tasa de DN para condiciones anóxicas representa el 50% para un

COD de 0,4 mg/L y solo un 4% con un COD de 5,6 mg/L (Oh y Silverstein, 1999). Sin embargo, en el presente estudio (COD= 4,3 mg/L) se dieron velocidades específicas de DN mayores o similares a las informadas en literatura para condiciones anóxicas. Para los experimentos C y D, la síntesis y degradación de PHA fue similar a la observada en el ensayo A. El porcentaje y velocidades de DN así como la remoción de Ni alcanzada en el experimento D fueron similares a las del experimento C. Esto permite inferir que el incremento en la relación DQO:N no condujo a una mejoría en la remoción de Ni, concluyendo que no hubo limitación de C intracelular en el proceso DNA.

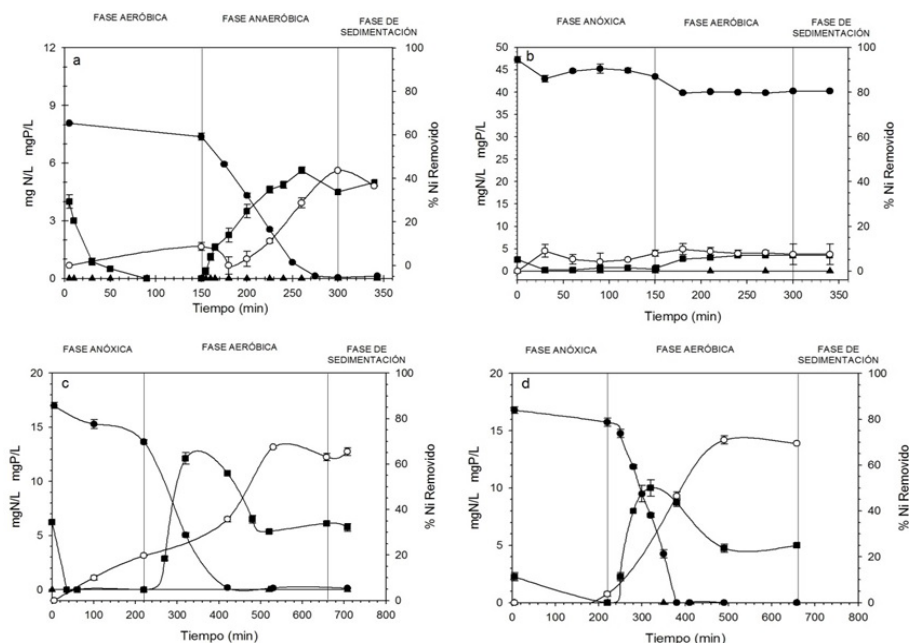


Fig.1. Remoción de N para los experimentos A(a), B(b), C(c), D(d): (●) amonio ( $\text{NH}_3\text{-N}$ , mgN/L); (■) nitrato ( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , mgN/L); (▲) nitrito ( $\text{NO}_2^-\text{-N}$ , mgN/L); (○) % de N inorgánico (Ni) removido.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo, el proceso de desnitrificación aeróbica (DNA) fue logrado en un reactor biológico secuencial (SBR) operado con fases: anóxica/aeróbica (AN/AE). El proceso de nitrificación seguido de la desnitrificación (DN) tuvo lugar en la fase aeróbica con alta concentración de oxígeno disuelto (COD). Se logró una remoción de nitrógeno inorgánico de 70% en el reactor operado con una COD superior a 4,0 mg/L, pH= 7,5, relación AN/AE= 0,5:1,0 y carga orgánica= 440-585 mgDQO/(Ldía). La relación DQO:N no afectó la eficiencia del proceso. La DNA fue atribuida a organismos acumuladores de glucógeno (GAOs) formadores de tétradas que utilizan polihidroxicanoatos o glucógeno intracelular como fuente de energía, siendo favorecidos por las condiciones oxidantes del sistema. El sistema AN/AE propuesto constituye un proceso sencillo y respetuoso del ambiente para la eliminación de nitrógeno, con disminución de la formación de  $\text{N}_2\text{O}$ , un gas de invernadero que influye fuertemente en el calentamiento atmosférico global.

## REFERENCIAS

- Ahn, Y.-H., 2006. Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: a review. *Process Biochem.* 41, 1709–1721.
- Al-Ahmady, K.K., 2006. Analysis of oxygen transfer performance on sub-surface aeration systems. *Int. J. Environ. Res. Publ. Health* 3, 301–308.
- Beun, J.J., Dircks, K., Van Loosdrecht, M.C.M., Heijnen, J.J., 2002. Poly-hydroxybutyrate metabolism in dynamically fed mixed microbial cultures. *Water Res.* 36, 1167–1180.

**Oh, J.**, Silverstein, J., 1999. Oxygen inhibition of activated sludge denitrification. *Water Res.* 33, 1925–1937.

**Plósz, B.G.**, Jobbágy, A., Grady Jr., C.P.L., 2003. Factors influencing deterioration of denitrification by oxygen entering an anoxic reactor through the surface. *Water Res.* 37, 853–863.

**Third, K.A.**, Burnett, N., Cord-Ruwisch, R., 2003. Simultaneous nitrification and denitrification using stored substrate (PHB) as the electron donor in an SBR. *Biotechnol. Bioeng.* 83, 706–720.

**Xu D.**, Chen H., Li X., Yang Q., Zeng T., Luo K., Zeng G. (2013) Enhanced biological nutrient removal in sequencing batch reactors operated as static/oxic/anoxic (SOA) process. *Biores. Technol.* 143, 204–211.

## SÍNTESIS DE PARTÍCULAS DE QUITOSANO IMPREGNADAS CON IONES FÉRRICOS PARA LA REMOCIÓN DE ARSÉNICO EN AGUAS DE CONSUMO

Lobo, C. C<sup>1</sup>; Colman Lerner, E.J<sup>2</sup>; Bértola, N, C<sup>1</sup>; Zaritzky, N, E<sup>1,3</sup>.

<sup>1</sup>Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA - CONICET, UNLP, CIC) 47 y 1116 s/N La Plata

<sup>2</sup>Centro de Investigaciones y Desarrollo en Ciencias Aplicadas (CINDECA-CONICET-UNLP)

<sup>3</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata  
zaritzky@ing.unlp.edu.ar

### INTRODUCCIÓN

La contaminación con Arsénico (As) en aguas subterráneas puede ser provocada tanto por procesos naturales geológicos como por actividades antropogénicas. En Argentina, este contaminante se encuentra distribuido en diferentes áreas de la Puna y la Llanura Chaco-Pampeana en un rango amplio de 10 a 5300 µg/L (Nicolli y col., 2012). En agua subterránea el arsénico inorgánico puede presentarse como Arsenito (As(III)) y Arseniato (As(V)), en forma individual o conjunta. As(III) es más tóxico y difícil de remover que As(V), por ello en los tratamientos convencionales para aguas se suele realizar la oxidación de As(III) a As(V). El estado de oxidación de As, y por tanto su movilidad, están controlados fundamentalmente por las condiciones redox (potencial redox, Eh) y el pH. En general, As(V) tiende a predominar frente a As(III) en las aguas superficiales, más oxigenadas que las aguas subterráneas. Sin embargo, en estas últimas no siempre predomina la forma trivalente, pudiéndose encontrar ambos estados de oxidación. Las concentraciones y proporciones relativas de As(III) y As(V) dependen de las condiciones redox y la actividad biológica. Como aproximación, se puede considerar que As(V) predomina sobre As(III) en aguas, encontrándose fundamentalmente como  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  a valores de pH bajos (inferiores a 6.9), mientras que a pH 7-12, la especie dominante es  $\text{HAsO}_4^{2-}$  (Valles-Aragón y col., 2014). En aguas subterráneas de la llanura Chaco-Pampeana de Argentina, debido al predominio de condiciones oxidantes la mayor parte del As se encuentra como As(V) (Sancha and Castro, 2001).

La presencia de As en aguas para consumo humano en Argentina ha ocasionado la existencia del hidroarsenicismo crónico regional endémico (HACRE), enfermedad crónica que se manifiesta principalmente por alteraciones dermatológicas, evolucionando hacia patologías más graves como distintos tipos de cáncer (Navoni y col., 2014). Debido a los graves efectos del As en la salud de la población, la Organización Mundial de la Salud ha recomendado un límite máximo permitido de 10µg/L de As en agua apta para consumo humano (OMS, 2011). En la Provincia de Buenos Aires la ley provincial N°11.820 del año 1993 estableció un límite máximo de 50 µg/L para agua de red. Por su parte el Código Alimentario Argentino en el Capítulo XII, Bebidas Hídricas, Agua y Agua Gasificada Artículos 982 y 983, modificados por Resolución Conjunta de la Secretaría de Políticas, Regulación y Relaciones Sanitarias N° 34/2012 y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos N° 50/2012, estableció un valor máximo de As en agua de bebida de 10 µg/L. Sin embargo, en regiones del país con suelos de alto contenido de As, se estableció un plazo de hasta 5 años para adecuarse al valor de 10µg/L o hasta contar con los resultados del estudio "Hidroarsenicismo y Saneamiento Básico en la República Argentina – Estudios básicos para el establecimiento de criterios y prioridades sanitarias en cobertura y calidad de aguas". En este nuevo escenario de marco regulatorio resulta imprescindible entonces el estudio de tecnologías de remoción de As. En los recientes años se han analizado varios métodos de remoción de As tales como: precipitación (Gupta y col., 2009), oxidación-coagulación (Zhang y col., 2010), membranas de intercambio iónico (Valles-Aragón y col., 2014) y adsorción (Boddu y col., 2008). La adsorción constituye un



método atractivo para la remoción de As en términos de costos, simplicidad de diseño y funcionamiento, especialmente para casas individuales y pequeños sistemas comunitarios. Actualmente, el empleo de materiales biológicos como por ejemplo biopolímeros como adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas está ganando más atención como un medio simple, eficaz y económico. La quitina (poli- $\beta$ -(1,4)-N-acetil-D-glucosamina), segundo polisacárido natural más abundante después de la celulosa, es uno de los componentes principales de las paredes celulares de los hongos, y del exoesqueleto de crustáceos e insectos. Por desacetilación se transforma en quitosano (poli- $\beta$ -(1,4)-D-glucosamina-N-acetil-D-glucosamina), un polielectrolito catiónico que exhibe características fisicoquímicas de notable interés, lo cual hace que presente múltiples aplicaciones en medicina, industria alimentaria y en el tratamiento de aguas. La quitina y quitosano pueden utilizarse como adsorbentes para la eliminación de As en aguas, sin embargo presentan baja capacidad de adsorción (Kwok y col., 2014). Por ello, la impregnación de quitosano con metales ha sido propuesta para incrementar la efectividad de remoción de As (Zhang y col., 2007; Qi y col., 2015). Varios óxidos de hierro han sido estudiados para la adsorción de As(III) y As(V), tales como óxido férrico hidratado amorfo y cristalino (Raven y col., 1998). En general la adsorción de As(V) en hierro se ve más favorecida que la de As(III). Los mecanismos implicados en el proceso de adsorción incluyen: adsorción en superficies de hidróxidos de hierro, atrapamiento del As(V) con hierro como floculante y formación de arseniato férrico ( $\text{FeAsO}_4$ ). La combinación de iones férricos y quitosano es una opción para la remoción de As; en particular la combinación de quitosano con nitrato férrico el cual posee ventajas como excelente adhesión y resistencia a solventes (Gang y col., 2010). Resulta interesante entonces estudiar la inmovilización de iones metálicos ( $\text{Fe}^{+3}$ ) en matrices de quitosano para la adsorción de As(V).

El objetivo del presente trabajo fue sintetizar partículas de quitosano impregnadas con iones férricos ( $\text{Fe}^{+3}$ ) para ser utilizadas en la remoción de As(V) determinando las condiciones óptimas de pH y concentración de adsorbente para el proceso.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Reactivos

El quitosano empleado fue adquirido de Sigma Aldrich, peso molecular medio y grado de desacetilación 85%.  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ , NaOH,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , HCl y  $\text{HNO}_3$  fueron adquiridos de Anedra S.A.  $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  fue de grado reactivo marca Biopack. Las soluciones de As(V) utilizadas en los ensayos fueron preparadas mediante diluciones de la solución stock de As(V) (300 mg/L) en agua destilada. El material de vidrio empleado en los ensayos fue lavado con  $\text{HNO}_3$  10% y enjuagado varias veces con agua destilada.

### Síntesis de partículas de Quitosano impregnadas con Hierro

Se realizó la síntesis de partículas de quitosano impregnadas iones férricos (Q-Fe) mediante la disolución de quitosano 2% p/v en  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (pH=2.5) a 50°C durante 24 h. Posteriormente, se agregó un volumen de ácido acético tal que la concentración final obtenida fue de 2% v/v; se agitó 4 h a 50°C. Una vez obtenido el hidrogel, se formaron las partículas por goteo mediante bomba peristáltica (Gilson Minipuls 3) utilizándose soluciones de NaOH de distinta concentración (0.5, 1 y 2M). Una vez formadas las partículas mediante gelificación iónica, se mantuvieron 2 h en agitación en la solución NaOH para obtener la estabilización de la matriz. Posteriormente, las partículas fueron lavadas con agua destilada varias veces hasta obtener pH 7 en el líquido de lavado. Finalmente fueron secadas en estufa (Drying Oven Modelo DHG-9123A) con convección a 40°C hasta obtener peso constante.

### Adsorción de As(V)

Se analizó el porcentaje de remoción de As(V) (307  $\mu\text{g/L}$ ) utilizando 0.2, 0.5, 1, 1.5 y 2 g/L de partículas Q-Fe. Los ensayos fueron realizados en un incubador shaker (Barnstead Max

4000) a 25°C, agitación de 200 rpm. El tiempo de contacto fue de 24 h y el pH 7.13. Una vez alcanzado el tiempo de contacto las partículas Q-Fe fueron separadas de la solución mediante filtración en membrana de 0.45 µm y se determinó la concentración de As(V) residual.

La cantidad de As(V) (µg) adsorbido por unidad de masa de partículas Q-Fe (g) fue determinado como:

$$q = \frac{C_i - C_t}{m} * V \quad (1)$$

donde q corresponde a la capacidad de adsorción de As(V) a 24 h,  $C_i$  y  $C_t$  son las concentraciones de As (µg/L) iniciales y en el tiempo t (24h), m la masa seca del adsorbente adicionado (g) y V (L) el volumen de la solución.

Además, se analizó el efecto del pH sobre el porcentaje de remoción de 307 µg/L de As(V); el pH fue ajustado mediante la adición de NaOH 0.5 M o HCl 1 M.

### Métodos analíticos

La concentración de As(V) fue determinada mediante Espectroscopía de Absorción Atómica en un equipo Shimadzu AA-7000, con generador de hidruros. El acoplamiento de un generador de hidruros al espectrómetro de absorción atómica aporta la sensibilidad requerida para poder determinar As, cuya baja longitud de onda (193.7nm) dificulta el análisis por Espectroscopia de Absorción Atómica. La técnica de generación de hidruro, está basada en la reacción de Marsh y Gutzeit en la cual se emplea zinc como reductor (Standard Methods, 1992). Esta técnica consta de tres etapas fundamentales: la generación y volatilización del hidruro, la transferencia del mismo y su posterior atomización en el espectrómetro de Absorción Atómica. La generación del hidruro, en el presente trabajo se obtuvo tratando la muestra que contenía As con una disolución de Borohidruro de sodio ( $\text{NaBH}_4$ ) en medio ácido (HCl). La curva de calibración, de 2, 10, 20 y 50 µg/L, se realizó a partir de solución stock estándar de As 1000 mg/L (Accustandard).

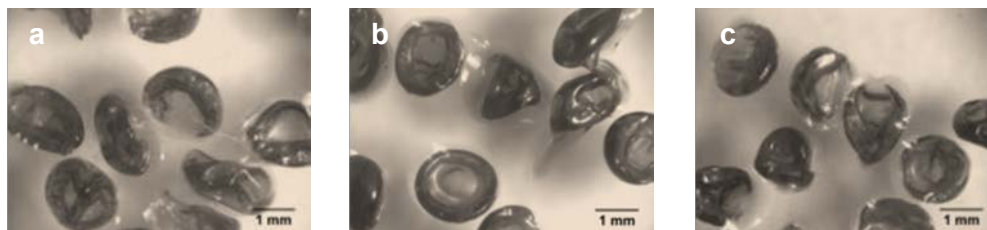
La concentración de hierro (Fe) una vez finalizado el ensayo de adsorción de As(V) se determinó por espectrofotometría usando el método FerroVer (Método Hach N° 8008, adaptado de Métodos Estándar). El reactivo FerroVer está compuesto por: tiosulfato de sodio, ácido 1,10-Fenantrolina-p-toluenosulfónico, hidrosulfito de sodio, citrato de sodio y metabisulfito de sodio. Los agentes reductores convierten todas las formas de Fe solubles y la mayoría de las formas insolubles de Fe, presentes en la muestra, en Fe ferroso soluble. Este reacciona con el indicador 1,10 Fenantrolina para formar un color naranja proporcional a la concentración de Fe. La lectura se realiza a 510 nm. Fe total soluble residual se determinó al final del proceso de adsorción (t=24h) con una concentración inicial de As(V) de 307 µg/L, 1g/L de partículas Q-Fe, pH 5.12, temperatura 25°C y agitación 200 rpm.

## RESULTADOS

### Efecto de la concentración de NaOH en la síntesis de partículas de quitosano impregnadas con iones férricos (Q-Fe)

Se analizó la síntesis de las partículas Q-Fe utilizando distintas concentraciones de NaOH para su gelificación. En este tipo de gelificación se logra obtener quitosano sólido a partir del incremento del pH a un valor cercano al  $\text{pK}_a$  del quitosano (pH 6.5). Por lo tanto, la concentración de NaOH empleada es un parámetro clave para la obtención de partículas estables. El peso seco obtenido luego del proceso de secado no varió significativamente en función de la concentración de NaOH empleada en la gelificación. El peso seco obtenido para 30 partículas Q-Fe fue  $33.7 \pm 0.7$ ,  $32.2 \pm 0.6$  y  $32.5 \pm 0.8$  mg para 0.5, 1 y 2 M de NaOH. Asimismo, la forma y la consistencia de las partículas fueron similares para las tres concentraciones analizadas. El tamaño obtenido para las partículas Q-Fe secas fue

aproximadamente de 1.5 mm, con forma de discos (Figura 1). Posteriormente, una vez transcurrido el contacto con la solución conteniendo As(V), las partículas se hidrataron y adquirieron una forma esférica. Sin embargo, el diámetro se mantuvo aproximadamente constante. Por lo tanto, se seleccionó la concentración de 0.5M de NaOH para todos los ensayos posteriores realizados, ya que es la solución de más baja concentración de hidróxido y con menor impacto ambiental.

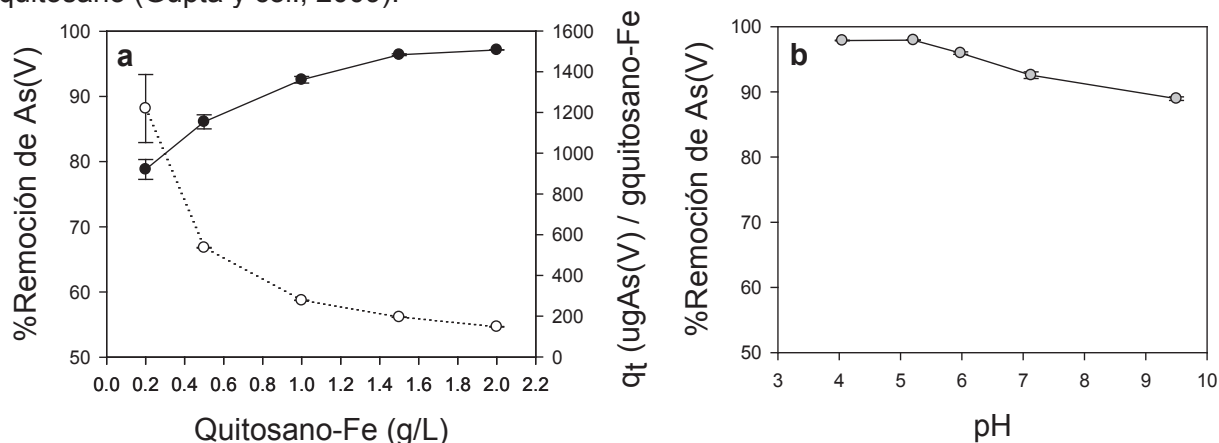


**Figura 1.** Partículas de quitosano deshidratadas. Concentración de hidróxido de sodio a) 0.5M, b) 1M, c) 2M

### Remoción de As(V) en función de la concentración de adsorbente

El efecto de la concentración de adsorbente en la remoción de 307  $\mu\text{g/L}$  de As(V) a pH 7.13 se encuentra en la Figura 2a. El porcentaje de remoción de As(V) se incrementó de 78.8% a 97.1% con el incremento de la concentración de partículas Q-Fe de 0.2 a 2 g/L; esto se debió a una mayor proporción de sitios activos para la adsorción de As(V). Por el contrario, la capacidad de adsorción es decir la cantidad de As adsorbido por masa de adsorbente (Ecuación 1) disminuyó con el incremento de la concentración de partículas de Q-Fe. La capacidad de adsorción para 0.2 g/l de partículas Q-Fe fue de  $1219.3 \pm 167.1 \mu\text{gAs(V)/g}$  partículas Q-Fe, mientras que para 2 g/L fue de  $148.1 \pm 1.4 \mu\text{gAs(V)/g}$  partículas Q-Fe.

En la Figura 2a se puede observar que la adición de una concentración mayor a 1g/L de adsorbente permitió obtener una remoción mayor al 90%. Considerando un balance entre el porcentaje de remoción de As(V) y la capacidad de adsorción ( $q$ ), se seleccionó una concentración de adsorbente de 1 g/L para los ensayos posteriores. Esta concentración de adsorbente ha sido seleccionada previamente por otros autores para partículas de quitosano impregnadas con hierro y manganeso (Qui y col 2015) y para nanopartículas magnéticas de quitosano (Gupta y col., 2009).



**Figura 2. a.** Efecto de la concentración de adsorbente en el porcentaje de remoción (●) y capacidad de adsorción ( $q$ ; ○) de As(V). Concentración inicial 307  $\mu\text{g/L}$ , pH 7.13, temperatura 25°C, tiempo de contacto 24h. **b.** Efecto del pH en el porcentaje de remoción de As(V). Concentración inicial 307  $\mu\text{g/L}$ , partículas Q-Fe 1 g/L, temperatura 25°C, tiempo de contacto 24 h.

### Remoción de As (V) en función del pH

En los procesos de adsorción el pH de la solución es una variable importante tanto para el adsorbente como para el adsorbato, debido a que ambos poseen grupos funcionales que pueden protonarse y desprotonarse para producir diferentes cargas superficiales. El efecto del pH en la adsorción de As(V) se muestra en la Figura 2b.

El máximo porcentaje de remoción de As(V) fue de 97.9% para el rango de pH entre 4 y 5.5. Esto pudo deberse a que en condiciones de acidificación es favorable la protonación de la superficie del adsorbente, por lo tanto en estas condiciones se obtuvo un alto porcentaje de adsorción de As(V) por medio de interacciones electrostáticas con la superficies de las partículas Q-Fe. En condiciones de pH ácido la concentración residual de As(V) obtenida fue  $6.6 \pm 0.2$  y  $6.3 \pm 0.04$   $\mu\text{g/L}$ , para pH 4.02 y pH 5.12, respectivamente. Estas concentraciones se encuentran debajo del límite de 10  $\mu\text{g/L}$  para aguas de consumo establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011).

Como puede observarse en la Figura 2b para pH entre 5 y 7, los porcentajes de remoción obtenidos fueron superiores al 90% disminuyendo al 85% para pH 9.5. Por lo tanto, en todo el rango de pH estudiado (pH 4-9.5) los porcentajes de remoción obtenidos fueron superiores al 85%. Esto pudo deberse a que en el rango de pH 2-11 As(V) predomina como anión  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  y  $\text{HAsO}_4^{2-}$  ( $\text{pKa}_1 = 2.3$ ,  $\text{pKa}_2 = 6.9$ , y  $\text{pKa}_3 = 11.5$ ) (Zhang y col., 2010), por ello, la adsorción de estas especies fue favorable en todo el rango de pH analizado. Además, las partículas mantuvieron su integridad física independientemente del pH del proceso de adsorción, lo cual permitiría separarlas posteriormente por filtración.

Finalmente se analizó la estabilidad de los iones férrico en las partículas de quitosano Q-Fe a pH 5.12. Se determinó que la concentración de  $\text{Fe}^{+3}$  residual en el agua posterior al proceso de adsorción de As(V) fue de  $0.035 \pm 0.01$   $\text{mgFe/L}$ . Esta concentración se encuentra debajo del límite de 3  $\text{mgFe/L}$ , establecido por el Código Alimentario Argentino, Capítulo XII, Bebidas Hídricas, Agua y Agua Gasificada Artículos 982 y 983 para aguas de consumo. Por lo tanto, se determinó que en condiciones de pH 5.12 y 1g/L de partículas Q-Fe, los iones  $\text{Fe}^{+3}$  quedan retenidos en la matriz de quitosano y la concentración de As(V) y  $\text{Fe}^{+3}$  finales obtenidas se encuentran debajo de los límites establecidos para aguas de consumo.

### CONCLUSIONES

La síntesis de partículas quitosano impregnadas con iones férricos (Q-Fe) fue analizada en función de la concentración de NaOH empleada para su gelificación. Se seleccionó la concentración de 0.5 M de NaOH para obtener partículas de Q-Fe estables para la adsorción de As(V).

Se pudo determinar que las partículas Q-Fe fueron efectivas en la remoción de As(V) para un amplio rango de concentración de adsorbente y de pH. Cuando se incrementó la concentración de adsorbente se obtuvieron mayores porcentajes de remoción. Una concentración adecuada de partículas Q-Fe para la adsorción de As(V) fue 1 g/L de adsorbente. Con la cual se obtiene un porcentaje de remoción de  $92.3 \pm 0.5$  % y una capacidad de adsorción de  $277.7 \pm 0.2$   $\mu\text{gAs(V)/g}$  partículas Q-Fe, para 307  $\mu\text{g/L}$  de As(V) inicial. En todo el rango de pH estudiado (4-9.5) con una concentración de adsorbente de 1g/L, los porcentajes de remoción alcanzados fueron mayores al 85%. El mayor porcentaje de remoción de As(V) fue de 97.9% para pH 5.12 alcanzándose un valor inferior a 10  $\mu\text{g/L}$  (límite establecido para aguas de consumo por la OMS). En estas condiciones, se determinó que los iones  $\text{Fe}^{+3}$  quedaron retenidos en la matriz de quitosano. Además, las partículas mantuvieron su integridad física en todo el rango de pH estudiado, lo cual permitiría separarlas posteriormente por filtración. Por lo tanto, las condiciones de pH ácido (pH4-5) y 1 g/L de adsorbente constituyen las condiciones óptimas para la adsorción de As(V) en partículas Q-Fe.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT), el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), la Fundación Bunge y Born, y la Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

## REFERENCIAS

- Boddu, V. M.**, Abburi, K., Talbott, J. L., Smith, E. D. y Haasch, R. (2008). "Removal of arsenic (III) and arsenic (V) from aqueous medium using chitosan-coated biosorbent." *Water Research* 42(3): 633-642.
- Gang, D. D.**, Deng, B. y Lin, L. (2010). "As(III) removal using an iron-impregnated chitosan sorbent." *Journal of Hazardous Materials* 182(1-3): 156-161.
- Gupta, A.**, Chauhan, V. S. y Sankararamkrishnan, N. (2009). "Preparation and evaluation of iron-chitosan composites for removal of As(III) and As(V) from arsenic contaminated real life groundwater." *Water Research* 43(15): 3862-3870.
- Kwok, K. C. M.**, Koong, L. F., Chen, G. y McKay, G. (2014). "Mechanism of arsenic removal using chitosan and nanochitosan." *Journal of Colloid and Interface Science* 416: 1-10.
- Navoni, J. A.**, De Pietri, D., Olmos, V., Gimenez, C., Bovi Mitre, G., de Titto, E. y Villaamil Lepori, E. C. (2014). "Human health risk assessment with spatial analysis: Study of a population chronically exposed to arsenic through drinking water from Argentina." *Science of The Total Environment* 499: 166-174.
- Nicolli, H. B.**, Bundschuh, J., Blanco, M. d. C., Tujchneider, O. C., Panarello, H. O., Dapeña, C. y Rusansky, J. E. (2012). "Arsenic and associated trace-elements in groundwater from the Chaco-Pampean plain, Argentina: Results from 100 years of research." *Science of The Total Environment* 429: 36-56.
- Organización Mundial de la Salud** (2011). "Guidelines for drinking water quality." World Health Organization.
- Qi, J.**, Zhang, G. y Li, H. (2015). "Efficient removal of arsenic from water using a granular adsorbent: Fe-Mn binary oxide impregnated chitosan bead." *Bioresource Technology* 193: 243-249.
- Raven, K. P.**, Jain, A. y Loeppert, R. H. (1998). "Arsenite and Arsenate Adsorption on Ferrihydrite: Kinetics, Equilibrium, and Adsorption Envelopes." *Environmental Science & Technology* 32(3): 344-349.
- Sancha, A.M., Castro, M.L.** (2001). *Arsenic Exposure and Health Effects IV. Arsenic in Latin America: Occurrence, exposure, health effects and remediation*, 1 ed. Elsevier Science Ltd., Kidlington, Oxford, UK.
- Standars Methods.** (1992). *Continuous Hydride Generation/Atomic Absorption Spectrometric Method (PROPOSED)* 18 Th Edition 3 :32-33.
- Valles-Aragón, M. C.**, Olmos-Márquez, M. A., Llorens, E. y Alarcón-Herrera, M. T. (2014). "Redox potential and pH behavior effect on arsenic removal from water in a constructed wetland mesocosm." *Environmental Progress & Sustainable Energy* 33(4): 1332-1339.
- Zhang, G.**, Qu, J., Liu, H., Liu, R. y Wu, R. (2007). "Preparation and evaluation of a novel Fe-Mn binary oxide adsorbent for effective arsenite removal." *Water Research* 41(9): 1921-1928.
- Zhang, S.**, Niu, H., Cai, Y., Zhao, X. y Shi, Y. (2010). "Arsenite and arsenate adsorption on coprecipitated bimetal oxide magnetic nanomaterials: MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>." *Chemical Engineering Journal* 158(3): 599-607.



## ANÁLISIS DEL DESARROLLO DE *LISTERIA MONOCYTOGENES* EN UN PRODUCTO CÁRNICO SOMETIDO A ALTA PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Giménez Belén (1), Graiver Natalia (1), Giannuzzi Leda (1), Zaritzky Noemí (1,2)

(1) Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), CONICET, Fac. de Ciencias Exactas, UNLP, La Plata, Buenos Aires Argentina.

(2) Depto. Ingeniería Química, Fac. de Ingeniería, UNLP, La Plata, Buenos Aires Argentina. belengimenez@live.com.ar, nataliagraiver@hotmail.com, [zaritzkynoemi@gmail.com](mailto:zaritzkynoemi@gmail.com)

### INTRODUCCIÓN

Una de las tecnologías emergentes en preservación de alimentos con un gran potencial en el área de productos cárnicos que podría usarse para el control de microorganismos es la alta presión hidrostática (APH), que es un proceso no térmico de preservación con mínimos efectos en el contenido nutricional de los alimentos. El tratamiento de APH por encima de 300 MPa a temperatura ambiente puede mejorar la seguridad microbiológica y extender la vida útil del producto (Balasubramaniam y Farkas, 2008 y Carlez *et al.*, 1994). Asimismo, el tratamiento APH conserva mejor el sabor que el tratamiento térmico, ya que sólo afecta a enlaces no covalentes (Cheftel y Culioli, 1997). La eficacia del proceso depende de parámetros tecnológicos como la presión, mantenimiento de temperatura y tiempo, así como del tipo y estado fisiológico de los microorganismos, y de las propiedades intrínsecas del alimento (pH, aw) (Bover-Cid *et al.*, 2011; Hugas *et al.*, 2002; Hereu *et al.*, 2012; Jofré *et al.*, 2009). En el caso de carne bovina el tratamiento de APH afecta los parámetros de color, atenuando significativamente la tonalidad roja característica. La decoloración en carnes frescas pigmentadas es producida a niveles superiores a 300 MPa, por lo cual se necesita un tratamiento previo de la carne bovina con preservadores químicos que permite la formación de nitrosomioglobina, una proteína que tiene la característica de ser más resistente a las altas presiones, manteniendo un color adecuado en la superficie del producto.

Las Enfermedades Transmitidas por Alimentos (ETA) constituyen uno de los problemas de salud de mayor importancia, tanto en los países desarrollados, como en los países en vías de desarrollo. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (Food and Agriculture Organization, FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) están preocupadas por el aumento en la incidencia de estas enfermedades en las últimas décadas. El desarrollo de nuevos productos alimenticios y nuevas tecnologías de procesamiento, el uso de sistemas centralizados de distribución rápida y el aumento del comercio internacional, representan un desafío tanto para la industria como para los organismos de control. Los cambios de hábitos y tendencias de consumo, la existencia de poblaciones especialmente susceptibles debido al envejecimiento, la desnutrición, personas inmuno-suprimidas, niños, mujeres embarazadas y los cambios en las poblaciones microbianas también representan un riesgo desde el punto de vista de las ETA (Alvarez Martínez, 2007).

La listeriosis, cuyo agente etiológico es *Listeria monocytogenes*, es una de las principales enfermedades de transmisión alimentaria y de mayor relevancia en la salud pública, debido al impacto social y económico que tiene por la gravedad de su cuadro clínico. (Muñoz *et al.*, 2011). *Listeria monocytogenes* es un microorganismo ubicuo que sobrevive mucho tiempo en los alimentos, por lo cual constituye una gran preocupación para la industria agroalimentaria. Las bacterias pertenecientes al género *Listeria* son bacilos Gram-positivos cortos, regulares, aerobio o anaerobio facultativo, no esporulados ni ramificados, que suelen observarse en disposición individual o formando cadenas cortas. Presentan de 1 a 5 flagelos peritricos que les confieren movilidad a 28°C. Las colonias son pequeñas (de 1 a 2 mm tras uno o dos días de incubación) y lisas. Su temperatura óptima de crecimiento está entre 30°C y 37°C. Se lo considera un patógeno psicrótrofo, capaz de desarrollar a

temperaturas de refrigeración (0-8°C), puede crecer a 4°C en pocos días a diferencia de otras bacterias patógenas como *Salmonella* o *Staphylococcus aureus*, que son inhibidas en su crecimiento a bajas temperaturas y además es capaz de desarrollarse a pH de 4,4 a 9,6 (Muñoz *et al.*, 2011). Asimismo, crece en concentraciones altas de NaCl 10% y sobrevive a concentraciones entre 16 y 20%. (Marzocca, *et al.* 2004).

El patógeno a pesar de no formar endosporas es capaz de sobrevivir por largos periodos de tiempo en el medio ambiente, en las plantas procesadoras de alimentos y en el interior de los refrigeradores. A pesar de encontrarse con frecuencia en alimentos crudos, los casos de listeriosis generalmente se relacionan con aquellos productos listos para el consumo, los cuales se conservan refrigerados por un periodo prolongado de tiempo o con los alimentos contaminados después del procesamiento térmico (FAO, 2000).

El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto de APH sobre el color y el desarrollo de *Listeria monocytogenes* inoculada en carne bovina sometida a un pre-tratamiento con preservadores químicos durante un almacenamiento refrigerado a 4°C y 10°C.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Materia prima.** Para el ensayo se utilizaron cortes de músculos aductor femoris y semimembranoso (nalga). Los músculos se separaron luego de 48 horas postmortem y se eliminó grasa visible y se extrajeron discos (diámetro 6cm y espesor 3mm). Las materias primas tenían un valor de pH entre 5.4 y 5.7.

**Tratamiento químico.** El proceso involucró un tiempo de difusión de sales en secciones de carne bovina, que se sumergieron durante 2.5 h en la solución de inmersión compuesta por: 0.62g/L NaNO<sub>2</sub>, 8.5g/L ácido ascórbico y 30g/L NaCl.

**Preparación del inóculo y proceso de inoculación.** Se realizó un ensayo con muestras que fueron inoculadas con *Listeria monocytogenes* cepa L261, (cultivo provisto por la Facultad de Ciencias Veterinarias de la UNLP). Inicialmente se realizó la activación de la cepa, para ello se descongelaron las mismas, se tomó 1 ml del cultivo y se sembró en un tubo con TSB (caldo triptona soja), se incubó por 24 h a 37°C. Al día siguiente, se tomó 1 ml del caldo crecido y se sembró nuevamente en un tubo con TSB. Se realizaron 3 repiques.

Posteriormente a la etapa de tratamiento químico de la muestra, se inoculó cada una de forma individual con 100 µl de un cultivo de 24 h de *L. monocytogenes*. El ensayo se llevó a cabo utilizando dos concentraciones de inóculo 10<sup>3</sup> y 10<sup>5</sup> UFC/gramo de tejido cárnico.

**Envasado de las muestras.** Las muestras de carne inoculadas, y las muestras sin inocular se envasaron individualmente al vacío en bolsas Cryovac BB4L (Sealed Air, Buenos Aires, Argentina), y se sometieron al proceso de alta presión hidrostática (APH).

**Aplicación de Alta presión Hidrostática (APH).** El tratamiento de APH se llevó a cabo en un sistema de Stansted Fluid Power (modelo FPG9400:922, cilíndrico de 2 litros de capacidad, presión máxima de trabajo 900MPa, rango de temperatura: de -20 a 120 °C) en el Laboratorio del INTA Castelar. La velocidad de presurización con la que operó el equipo fue de 300 MPa/min y la despresurización se realizó instantáneamente. Se utilizaron dos niveles de presión 400 y 600 MPa. El tiempo de proceso de APH fue de 5 min. La temperatura de trabajo fue 20°C ± 5°C.

**Almacenamiento refrigerado.** Luego del tratamiento de las muestras se almacenaron refrigeradas a 4°C y 10°C. Se incluyeron dos controles: 1) CF: discos de carne inoculadas y no presurizadas y 2) CS: carne sometida al tratamiento químico, inoculada y no presurizada.

**Determinaciones de cloruro y nitrito.** La cantidad de NaCl presente en el tejido después del tratamiento se determinó mediante un electrodo selectivo (Cole-Parmer 27.502-12) y la determinación de nitrito se llevó a cabo utilizando el kit Hach Nitriver 3 (método 371), según Graiver *et al.* (2006).

**Determinación de parámetros de color.** Se realizó con un colorímetro triestímulo Minolta C400 el cual utiliza la escala de color CIE Lab\*, mediante la cual el color es descrito por los parámetros de luminosidad L\*, y de cromaticidad a\* y b\*. Las determinaciones se realizaron semanalmente sobre 3 rodajas de carne, obteniendo 6 medidas para cada muestra.

**Actividad acuosa.** Se evaluó el efecto del tiempo de almacenamiento que y la APH sobre la aw de las muestras. Se realizó en un equipo Aqua Lab Serie 3 (Decagon Devices, USA)

calibrado con una solución de  $K_2SO_4$  ( $a_w = 0.979 \pm 0.005$ ) y agua bidestilada ( $a_w = 1$ ). Las medidas fueron realizadas a  $25^\circ C$  por duplicado.

**Análisis microbiológicos.** Semanalmente se analizó el desarrollo microbiano de *L. monocytogenes* en los productos mediante recuento en placa (medio PALCAM) agar PALCAM, que contiene cloruro de litio, polimixina B, acriflavina y ceftazidima. Se incubaron las placas durante 24 horas a  $37^\circ C$ . Se utilizó para los ensayos microbiológicos carne fresca inoculada como control. Además se realizó un ensayo de presencia-ausencia en los casos donde no se encontró desarrollo de *Listeria*. El método de cultivo convencional consta de un procedimiento de enriquecimiento basado en la utilización de medios de cultivo líquidos que contengan agentes selectivos para tratar de recuperar las células de *L. monocytogenes* en estado subletal. Se pesaron 25 g de la muestra en una bolsa de stomacher, se agregó 225 ml de caldo TSB al que se le adicionó acriflavina, ácido nalidixico y cicloheximida y se homogeneizó durante 2 minutos  $\pm$  0.2 minutos en Stomacher. Se incubó durante 24 h  $\pm$  2 h a  $37^\circ C \pm 2^\circ C$ . Se trabajó con 2 dos concentraciones de inóculo  $10^3$  y  $10^5$  UFC/g de *L. monocytogenes*

**Análisis estadístico.** Los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el software SYSTAT (SYSTAT Inc., 1990, v. 10.0). Las diferencias significativas entre las medias fueron determinadas por el método de la menor diferencia significativa, LSD ( $P < 0.05$ ).

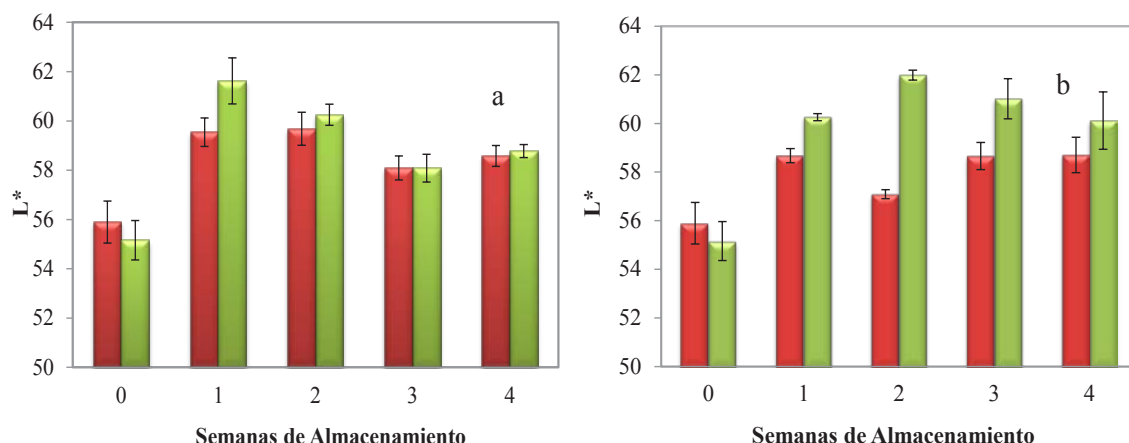
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**Concentración de nitrito y cloruro.** Las concentraciones de nitrito de sodio y cloruro de sodio en las muestras cárneas luego del tratamiento fueron:  $0.0017 \pm 0.0011$  g  $NaNO_2/100$  g tejido y  $1.67 \pm 0.05$  g  $NaCl/100$ g tejido cárneo para muestras sometidas a 400 MPa y  $0.0016 \pm 0.0005$  g  $NaNO_2/100$  g tejido y  $1.73 \pm 0.09$  g  $NaCl/100$ g tejido cárneo para muestras sometidas a 600 MPa, cumpliéndose con lo que establecido en la normativa vigente. El uso de nitrito de sodio, nitrato de potasio o de su combinación no debe superar los 200 ppm (0.2 mg / g), expresado en nitrito de sodio en el producto final (USDA-FSIS 1999).

**Actividad acuosa.** Se observó que tanto las presiones empleadas, la temperatura y el tiempo de almacenamiento refrigerado no influyeron significativamente en la actividad acuosa del producto, siendo el valor medio de  $0.9857 \pm 0.0009$ .

**Color.** En trabajos previos (Giménez *et al.* 2014) se observó que al someter las muestras cárnicas a APH sin aplicar ningún tratamiento químico previo se perdía el color rojo característico de la carne bovina obteniéndose un resultado inaceptable para el consumidor. Sin embargo el tratamiento químico propuesto del producto cárnico previo al APH, permite la formación de nitrosomioglobina manteniendo un color adecuado en la superficie del producto, ya que es un pigmento más estable a las altas presiones debido a su mayor resistencia a la oxidación comparado con la mioglobina y la oximioglobina (Rubio *et al.*, 2007). Del análisis de varianza realizado se encontró que la luminosidad  $L^*$  se vio afectada significativamente tanto por el tiempo de almacenamiento como por las presiones ensayas no siendo significativa la temperatura. Las interacciones dobles entre estas variables afecta significativamente este parámetro. Las muestras sometidas a 400 MPa presentaron un menor valor de  $L^*$  que las muestras sometidas a 600 MPa (**Figura 1 a, b**) a ambas temperaturas de almacenamiento, esto concuerda con lo expuesto por Bak *et al.* (2012) quien reportó que el aumento de la presión por encima de 300 MPa conduce a un pequeño aumento en la luminosidad. El parámetro  $a^*$  dependió significativamente ( $P < 0.05$ ) de la presión ensayada, de la temperatura de almacenamiento, del tiempo y de la interacción entre estos tres factores. En función de las presiones, las muestras tratadas a 400 MPa presentaron un mayor valor de  $a^*$  comparadas con las muestras tratadas a 600 MPa; esto se debe al efecto de las altas presiones sobre las proteínas sarcoplásmicas. A ambas presiones se produjo una disminución del parámetro  $a^*$  durante el tiempo de almacenamiento.

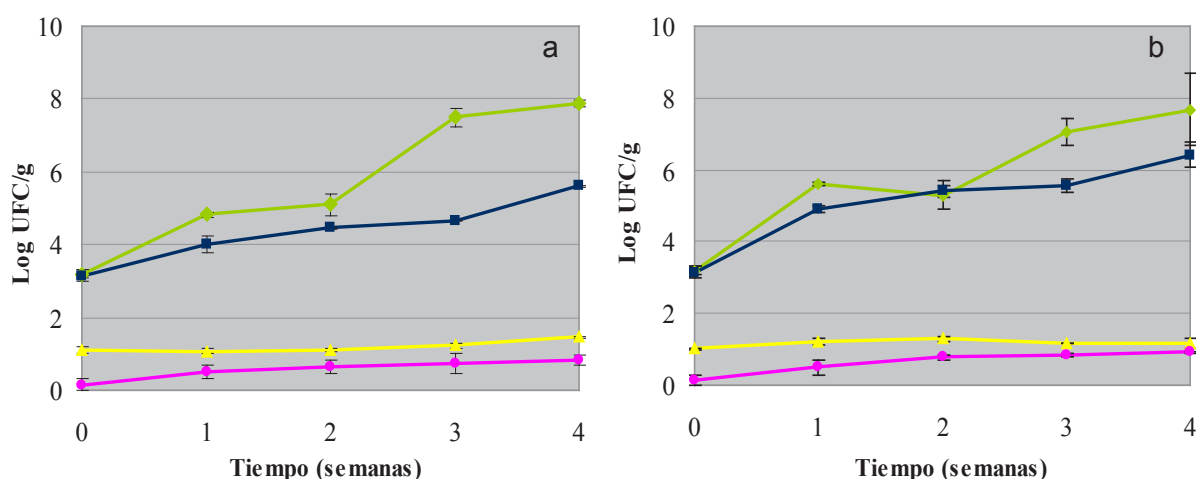
En función de la temperatura, se observó que las muestras almacenadas a  $4^\circ C$  presentaron un mayor valor de  $a^*$  que las muestras almacenadas a  $10^\circ C$ . Sin embargo en todos los casos, los valores obtenidos de  $a^*$  para las diferentes condiciones estaban en el rango entre  $13.82 \pm 0.43$  y  $20.14 \pm 0.26$ , siendo adecuados para el producto



**Figura 1:** Variación de la luminosidad ( $L^*$ ) de las muestras cárnicas en función del tiempo para las presiones: (—) 400MPa y (—) 600MPa, almacenadas a las temperaturas: a) 4°C y b) 10°C.

desarrollado. También se midieron los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  en la muestra sin tratamiento (carne fresca, CF) obteniéndose los valores:  $L^*$  39.59±0.15,  $a^*$  20.28±0.12

**Análisis microbiológicos.** El crecimiento de *L. monocytogenes* en alimentos viene influenciado por factores intrínsecos (pH,  $a_w$ , nutrientes, etc.) propios del alimento y extrínsecos (temperatura, humedad relativa, etc.) propios de zona de procesamiento y almacenamiento. Asimismo, su crecimiento también viene determinado por la presencia de algunos compuestos como el NaCl, el lactato o los nitratos y nitritos (Vitas *et al*, 2004), presentes en la composición de productos cárnicos. La **Figura 2 a, b** corresponde a muestras inoculadas con  $10^3$  UFC/g y almacenadas a dos temperaturas diferentes 4°C (**Fig 2 a**) y 10°C (**Fig 2 b**). Se puede observar que las muestras tratadas con la solución de aditivos químicos, inoculadas y sometidas a APH en los dos niveles de presión y almacenadas tanto a 4°C como a 10 °C, presentaron recuentos por debajo del límite de detección (2 log UFC/g) lo cual significa que las altas presiones afectaron a las bacterias, impidiendo así su desarrollo normal. Debe señalarse la notoria disminución del recuento inicial después del tratamiento con altas presiones disminuyendo la concentración microbiana en alrededor de 3 ciclos logarítmicos.



**Figura 2:** Recuentos de *Listeria monocytogenes* durante el almacenamiento a: a) 4°C y b) 10°C, de (●) carne fresca, (■) carne sumergida en la solución de aditivos químicos, (▲) carne sumergida en la solución de aditivos químicos y sometida a 400 MPa y (■) carne sumergida en la solución de aditivos químicos y sometida a 600 MPa.

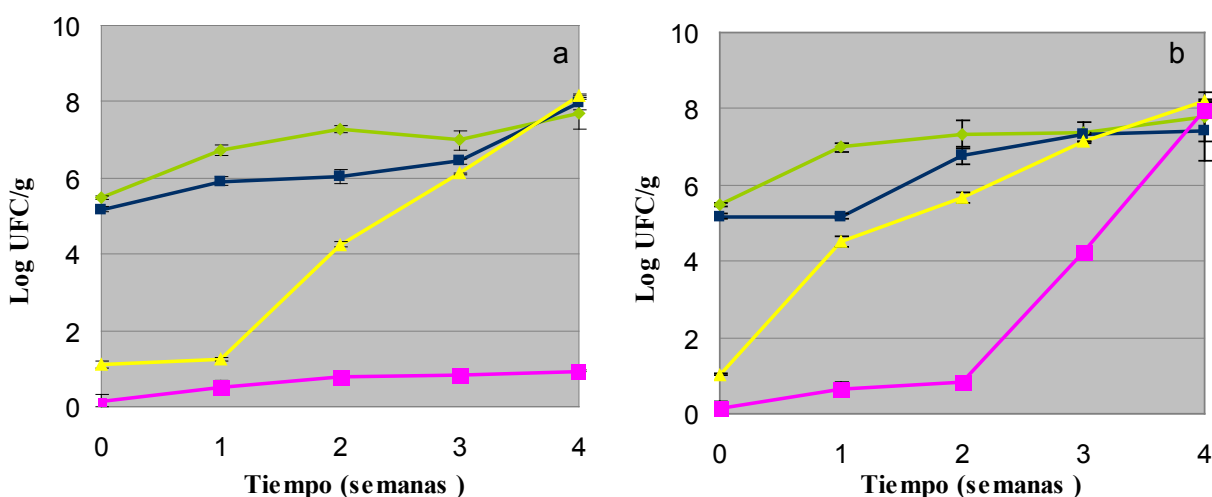
En cambio las muestras frescas (CF) y las tratadas con la solución de aditivos químicos

(CS) que fueron inoculadas, presentaron un recuento por encima de 3 log UFC/g, aumentando a lo largo del almacenamiento refrigerado. En el caso de las muestras almacenadas a una temperatura de refrigeración de 10°C, se observó un crecimiento mayor.

La **Figura 3** corresponde a muestras inoculadas con  $10^5$ UFC/g y almacenadas a dos temperaturas: 4°C (**Fig 3 a**) y 10°C (**Fig 3 b**). En el caso de las muestras tratadas con APH se observa que las muestras sometidas a 600 MPa presentaron un menor crecimiento que las muestras sometidas a 400 MPa, evidenciando el mayor efecto que produce las altas presiones sobre las bacterias, sin embargo el hecho de tener una mayor cantidad de inóculo inicial podría provocar un efecto de protección en las bacterias que permitiría luego el crecimiento de las mismas durante el almacenamiento. Con respecto a las temperaturas de almacenamiento, no se observó crecimiento a 4°C para las muestras tratadas a 600 MPa durante todo el período y en el caso de las muestras tratadas a 400 MPa, durante la primera semana no se registró crecimiento microbiano. En cambio a 10°C, se notó crecimiento durante la primera semana para 400 MPa y luego de la segunda semana para el tratamiento de 600 MPa, llegando a una concentración final igual para todas las muestras. Se observa que las bacterias que fueron sometidas a APH presentan una cinética de crecimiento distinta a la de las muestras no sometidas a altas presiones; esto podría deberse a una adaptación de la bacteria luego de estar expuesta a condiciones adversas.

Bozoglu *et al* (2004) estudiaron el efecto de la alta presión hidrostática sobre la *L. monocytogenes* y encontraron que luego de un tratamiento a 450 y 550 MPa estas bacterias se vieron afectadas, pero durante el almacenamiento refrigerado a 4°C hay un proceso completo de reparación que podría deberse a la naturaleza psicrotrófica de dichas bacterias. Si bien no se conocen aún los sitios en que se producen los daños celulares de las bacterias, podrían afectarse por la APH la pared celular, la membrana citoplasmática, ADN, ARN y ciertas enzimas dependiendo de la cepa específica.

Con respecto a las muestras frescas (CF) y las tratadas con la solución de aditivos químicos (CS) que fueron inoculadas, éstas presentaron un mayor recuento al inicio y se obtuvo al término del almacenamiento una concentración final similar a la presentada por las muestras inoculadas con una menor concentración de bacterias.



**Figura 3:** Recuentos de *Listeria monocytogenes* durante el almacenamiento a: a) 4°C y b) 10°C, de: (●) carne fresca, (■) carne sumergida en la solución de aditivos químicos, (▲) carne sumergida en la solución de aditivos químicos y sometida a 400 MPa y (■) carne sumergida en la solución de aditivos químicos y sometida a 600 MPa.

Para ambas concentraciones de inóculo se observa que el crecimiento de *Listeria monocytogenes* durante el almacenamiento refrigerado, a las dos temperaturas 4 y 10°C, en la carne con el pretratamiento químico es similar al obtenido en la carne fresca, por lo que



podemos concluir que el tratamiento químico previo no produce un efecto bacteriostático; esto podría deberse a la capacidad de este patógeno a crecer en elevadas concentraciones de NaCl y a la baja concentración de nitrito en la muestra. Estos resultados concuerdan con lo observado por Myers *et al.* (2013). Las recomendaciones del Código Alimentario Argentino (CAA) para asegurar la calidad de este tipo de productos son que se debe tener ausencia de *L. monocytogenes* en 25 g de muestra. En el ensayo de presencia-ausencia realizado en las muestras donde no se observó desarrollo, luego del enriquecimiento y siembra en placa se encontró la presencia de *Listeria monocytogenes*, por lo que podemos concluir que el tratamiento de alta presión hidrostática no elimina este patógeno de las muestras cárnicas, sino que dependiendo de la presión aplicada produce daño que puede repararse durante el almacenamiento.

## CONCLUSIONES

Se puede concluir que la utilización de APH como procedimiento de control del desarrollo de *Listeria monocytogenes* en un producto cárnico fue efectivo para disminuir los recuentos iniciales después del tratamiento.

Durante las primeras dos semanas de almacenamiento en todas las condiciones ensayadas, se observó disminución de la carga bacteriana inicial, siendo más eficiente el tratamiento a 600 MPa que a 400 MPa. Además se concluye que los parámetros de color de las muestras cárnicas se modificaron debido al proceso de APH y el almacenamiento refrigerado, aunque presentaron valores adecuados para su consumo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez Martínez N. Virulencia, resistencia y elementos genéticos móviles en serotipos no prevalentes de Salmonella entérica. Tesis doctoral 2007. Departamento de Biología Funcional Área de Microbiología. Universidad de Oviedo, España
- Bak, K. H., Lindahl, G., Karlsson, A. H., Lloret, E., Ferrini, G., Arnau, J., Orlie, V. (2012). High pressure effect on the color of minced cured restructured ham at different levels of drying, pH, and NaCl. *Meat Science*, 90: 690–696.
- Balasubramaniam, V. M., & Farkas, D. (2008). High-pressure food processing. *Food Science and Technology International*, 14, 413–418
- Bover-Cid, S., Belletti, N., Garriga, M., Aymerich, T. (2011). Model for *Listeria monocytogenes* inactivation on dry-cured ham by high hydrostatic pressure processing. *Food Microbiology*, 28: 804-809.
- Bozoglu F., Hami A., Gönül K. (2004). Injury recovery of foodborne pathogens in high hydrostatic pressure treated milk during storage. *FEMS Immunology and Medical Microbiology*, 40: 243-247
- Carlez, A., Rosec, J. -P., Richard, N., & Cheftel, J. -C. (1994). Bacterial growth during chilled storage of pressure-treated minced meat. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie*, 27, 48–54.
- Cheftel, J.C., Culioli, J. (1997). Effects of high pressure on meat: A review. *Meat Science*, 46: 211–236.
- Código Alimentario Argentino. Capítulo 6. Alimentos cárneos y afines. Artículo 286 tris - (Resolución Conjunta SPReI N°178/2012 y SAGyP N° 714/2012).
- Giménez, B., Graiver, N., Califano, A., Zaritzky, N. (2015). Physicochemical characteristics and quality parameters of a beef product subjected to chemical preservatives and high hydrostatic pressure. *Meat Science*, 100, 179–188
- Hereu A., Bover-Cid S., Garriga M., Aymerich T. (2012). High hydrostatic pressure and biopreservation of dry-cured ham to meet the Food Safety Objectives for *Listeria monocytogene*. *International Journal of Food Microbiology*, 154: 107–112
- Hugas, M., Garriga, M., Monfort, J. M. (2002). New mild technologies in meat processing: high pressure as a model Technology. *Meat Science*, 62: 359-371.
- Jofré, A., Aymerich, T., Grèbol, N., Garriga, M. (2009). Efficiency of high hydrostatic pressure at 600 MPa against food-borne microorganisms by challenge tests on convenient meat products. *Food, Science and Technology*, 42: 924-928.

- Marzocca, M., Marucci, P., Sica, M., Alvarez, E. (2004). Detección de *Listeria monocytogenes* en distintos productos alimenticios y en muestras de ambientes de una amplia cadena de supermercados de la ciudad de Bahía Blanca, Argentina. *Revista Argentina de Microbiología* 36: 179-181
- Muñoz A. I., Vargas M., Otero L., Díaz G., Guzmán V. (2011). Presencia de *Listeria monocytogenes* en alimentos listos para el consumo, procedentes de plazas de mercado y delicatessen de supermercados de cadena, Bogotá, D.C, 2002-2008. *Biomédica* 31:428-39
- Myers, K., Cannon, J., Montoya, D., Dickson, J., Lonergan, S., Sebranek, J. (2013). Effects of high hydrostatic pressure and varying concentrations of sodium nitrite from traditional and vegetable based sources on the growth of *Listeria monocytogenes* on ready-to-eat (RTE) sliced ham. *Meat Science*, 94, 69–76
- Rubio, B., Martínez, B., García-Cachan, M. D., Rovira, J. Jaime, I. (2007). Effect of high pressure preservation on the quality of dry cured beef “Cecina de León”. *Innovation Food Science and Emerging Technologies*, 8(7), 102-110.
- Vitas, A.I., Aguado, V., García-Jalón, I. (2004). Occurrence of *Listeria monocytogenes* in fresh and processed foods in Navarra (Spain). *International Journal of Food Microbiology*, 90, 349–356.

## REOLOGÍA Y MICROESTRUCTURA DE EMULSIONES ACEITE EN AGUA (O/W) ESTABILIZADAS CON MEZCLAS DE HIDROCOLOIDES

Gabriel Lorenzo<sup>1,2</sup>, Noelia Mori Cortés<sup>1</sup>, Noemí Zaritzky<sup>1,2</sup> y Alicia N. Califano<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CIDCA, CONICET, Fac. Cs. Exactas, UNLP, 47 y 116, La Plata (1900), Argentina.

<sup>2</sup>Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.

e-mail de contacto: [noe89lp@hotmail.com](mailto:noe89lp@hotmail.com)

### INTRODUCCIÓN

El campo de las emulsiones alimenticias ha sido ampliamente abordado en los últimos años [1,2], dando lugar a una gran diversidad de productos con distintas características estructurales y un comportamiento viscoelástico marcadamente diferente. Las emulsiones aceite en agua (o/w) se utilizan en numerosos procesos industriales y son la base de muchos productos alimenticios. Las emulsiones son sistemas termodinámicamente inestables y cuando el contenido lipídico es reducido esta inestabilidad se hace mayor. Esto hace imprescindible el agregado de emulsificantes y/o espesantes para volverlas cinéticamente estables. La elaboración de emulsiones con bajo contenido lipídico es una de las áreas en desarrollo donde se busca generar sistemas estables, con las características reológicas deseadas, a partir de un porcentaje de aceite reducido. El agregado de hidrocoloides como espesante o gelificante de la fase acuosa en este tipo de emulsiones resulta una interesante alternativa para el incremento de su estabilidad basado en la disminución de la velocidad de cremado, a partir de un aumento en la viscosidad de la fase continua [3,4]. Otra ventaja es que el incremento de la viscosidad del producto es percibido por los consumidores como un aumento en la calidad del mismo. Sin embargo, estos polisacáridos se deben agregar con precaución ya que también pueden afectar las interacciones coloidales presentes en la emulsión y provocar que la emulsión flocule, lo que podría llevar a su vez a que aumente la velocidad de cremado.

Uno de los atributos de calidad más relevantes en un alimento, y en particular en una emulsión, es la percepción por parte del consumidor, de una buena textura. La reducción del contenido lipídico genera una pérdida de la cremosidad y una menor aceptabilidad en el mercado de estos productos [4]. Es entonces necesario encontrar componentes que reflejen las cualidades deseadas por el consumidor, manteniendo un bajo contenido de aceite y un sistema estable en el tiempo. La reología resulta, entonces, una herramienta imprescindible a la hora de caracterizar las emulsiones alimenticias, y permite la vinculación de atributos de calidad con el comportamiento del sistema a nivel microestructural.

Las propiedades reológicas de una emulsión dependen del comportamiento reológico de la fase continua, de la fracción de aceite y de las posibles interacciones entre partículas. El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de la composición sobre la viscosidad y propiedades viscoelásticas de emulsiones aceite en agua (o/w) de bajo contenido lipídico, estabilizadas con mezclas de gomas xántica, guar y almidón de papa, a fin de poder predecir el comportamiento reológico en base a la composición del sistema.

## PARTE EXPERIMENTAL

### Materiales

Para la elaboración de las emulsiones se utilizaron: aceite comercial de girasol (AGD, Bs As, Argentina), almidón de papa, gomas xántica y guar y emulsificante monoestearato sorbitano polioxietileno (Tween 60) adquiridos de Sigma Chemical Co (St. Louis, MO). Se utilizó NaCl, ácido acético y sorbato de potasio de grado analítico y agua destilada.

### Preparación de las fases continuas

Se estudiaron 3 diferentes mezclas de hidrocoloides: i) 1% goma xántica (GX) ii) 5% almidón de papa (AP) + 0.5% GX, and iii) 0.5% GX + 0.5% goma guar (GG). Las dispersiones de GX y GX/GG se prepararon disolviendo ambas gomas en una solución acuosa con NaCl (2%) y ácido acético (2%). Las mezclas de AP/GX se prepararon, primero sometiendo a la dispersión de almidón a un tratamiento térmico a 90°C por 30 min y luego mezclando las dispersiones de goma y almidón en la misma solución acuosa.

### Preparación de las emulsiones

Las distintas fases continuas se emulsificaron con 10% y 20% de aceite en un homogenizador Ultra-Turrax T25 (Ika, Steufen, Alemania) a 11500 rpm, durante 4 min [3]. Se utilizó como emulsificante 1% de Tween 60 y para evitar el desarrollo microbiano se incluyó 0.1% de sorbato de potasio.

### Ensayos reológicos

Se realizaron ensayos reológicos dinámicos, en un reómetro de esfuerzo controlado Haake RS600 (Haake, Alemania), con una geometría plato-plato liso (diámetro 60mm), evaluándose los módulos elástico ( $G'$ ) y viscoso ( $G''$ ) en función de la frecuencia, previa determinación del rango de viscoelasticidad lineal mediante ensayos de barridos de esfuerzo a una frecuencia constante de (6.28 rad/s). Asimismo se obtuvieron las curvas de flujo en estado estacionario (viscosidad ( $\eta$ ) vs. velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ )) de las emulsiones y de las dispersiones acuosas, utilizando una geometría plato-plato rugoso (diámetro 35mm). Los ensayos se realizaron por triplicado.

### Distribución de tamaño de gotas y estabilidad visual

La distribución del tamaño de partículas fue establecida mediante análisis de imágenes obtenidas con un microscopio Leica DC100 equipado con una cámara digital, utilizando el software Global Lab Image/2 3.7 (Data Translation Inc.). Para analizar la estabilidad se colocaron dos alícuotas de cada una de las emulsiones ensayadas en probetas de 25 ml a 20 °C, en un cuarto de temperatura controlada, las cuales fueron observadas periódicamente.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Distribución de tamaño de gotas y estabilidad

Todas las emulsiones exhibieron una apariencia cualitativamente semejante, donde las gotas estaban organizadas en clusters o flóculos. Estos clusters pueden ser explicados en

término de la floculación por depleción causada por la presencia de moléculas de polisacáridos no adsorbidas.

A partir del análisis de imágenes se determinó la distribución de tamaño de gotas de las distintas emulsiones y se calculó el diámetro de Sauter ( $D[3,2]$ ) inicial y a los de 28 días de almacenamiento según:

$$D[3, 2] = \frac{\sum_{i=1}^N (n_i d_i^3)}{\sum_{i=1}^N (n_i d_i^2)} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde  $d_i$  es el diámetro de la gota de aceite,  $N$  es el número total de gotas y  $n_i$  es el número de gotas con diámetro  $d_i$ . También se calcularon las varianzas correspondientes, que están relacionadas con la polidispersidad del sistema [5].

La **Tabla 1** muestra los resultados obtenidos. Las emulsiones formuladas con AP + GX mostraron un  $D[3,2]$  ligeramente mayor, pero no se observaron diferencias en la polidispersidad de los distintos sistemas. Durante el almacenamiento no se observaron cambios significativos de diámetro o sus varianzas (**Tabla 1**), lo cual implica que no hubo coalescencia de las gotas.

**Tabla 1:** Diámetro de Sauter en función del tiempo de almacenamiento de emulsiones o/w 20% p/p. Las varianzas correspondientes se encuentran entre paréntesis.

Mezcla de hidrocoloides en la fase acuosa	D[3,2]	
	Inicial	28 días de almacenamiento
0.5% GX + 5% AP	14.2 (0.3)	14.6 (0.5)
1% GX	10.3 (0.2)	10.9 (0.2)
0.5% GX + 0.5% GG	11.1 (0.2)	11.3 (0.2)

### Comportamiento de flujo de las dispersiones acuosas y emulsiones

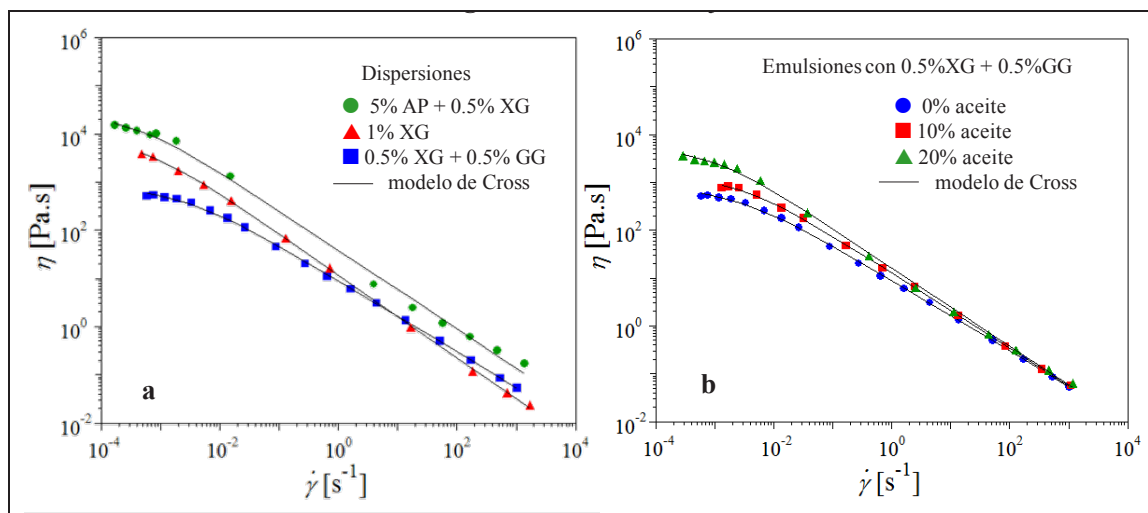
Las fases continuas de los sistemas estudiados presentaron un comportamiento pseudoplástico en un amplio rango de velocidades de deformación. La **Figura 1a** muestra una comparación del comportamiento de flujo en estado estacionario de las tres mezclas de hidrocoloides estudiadas.

En las mismas se observan dos zonas distintivas; la primera, a bajas velocidades de cizalla, indica una tendencia hacia un valor constante de viscosidad,  $\eta_0$ . A velocidades de cizalla mayores, la curva de flujo presenta un decaimiento tipo ley de la potencia en la viscosidad. En particular, la mezcla AP + GX presentó las viscosidades aparentes más altas (**Figura 1a**). También las emulsiones formuladas mostraron su características pseudoplásticas, como era esperable (**Figura 1b**); las curvas obtenidas tanto para dispersiones como para las correspondientes emulsiones se modelaron según Cross, sin considerar la segunda viscosidad newtoniana,  $\eta_\infty$ [6]:

$$\eta = \frac{\eta_0}{(1 + (\tau\gamma)^n)} \quad (\text{Ec. 2})$$



$\eta$  es la viscosidad correspondiente a una velocidad de deformación  $\dot{\gamma}$ ;  $\eta_0$  es la viscosidad a  $\dot{\gamma} = 0$ ;  $\tau$  el tiempo de relajación y  $n$  una medida de las características pseudoplásticas. La **Tabla 2** muestra los valores de  $\eta_0$  y  $\tau$  tanto para las emulsiones con 20% de aceite como para las correspondientes fases continuas al inicio y luego de 14 días de almacenamiento. En todos los casos la incorporación de aceite provocó un considerable aumento de  $\eta_0$  (**Figura 1b** y **Tabla 2**).



**Figura 1.** Curvas de flujo al tiempo inicial para: (a) dispersiones con distintos hidrocoloides (b) emulsiones con gomas xántica y guar y distintas concentraciones de aceite.

**Tabla 2.** Parámetros del modelo de Cross ( $\eta_0$ ,  $\tau$ ) para las fases continuas y para emulsiones 20% o/w en función del tiempo de almacenamiento

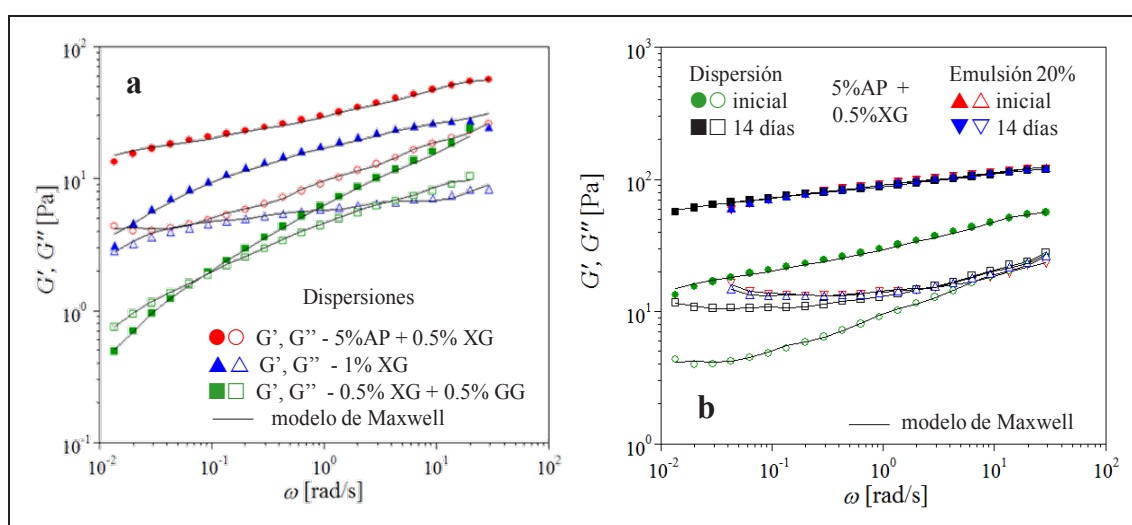
Fase continua	Aceite (%)	almacenamiento (días)	$\eta_0$ (Pa.s) $\times 10^{-3}$	$\tau$ (s) $\times 10^{-3}$
0.5% GX + 5% AP	0 %	1	26	2.9
		14	100	2.8
	20%	1	110	4.9
		14	140	110
1% GX	0 %	1	2.9	0.27
		14	2.8	0.28
	20%	1	6.0	0.82
		14	6.3	0.82
0.5% GX + 0.5% GG	0 %	1	0.79	0.44
		14	0.80	0.59
	20%	1	5.4	1.2
		14	24	5.1

La  $\eta_0$  de la fase dispersa que contenía AP/GX aumentó muy significativamente a lo largo del almacenamiento, debido al avance de la retrogradación del almidón, y el consiguiente reacomodamiento y aumento de zonas de unión (*junction zones*) entre cadenas de amilopectina. Sin embargo, este aumento fue mucho menor en las correspondientes emulsiones 20% O/W, ya que las gotas de aceite retardaron la formación de dichas zonas de

unión. Las fases acuosas preparadas con GX o GX/GG no modificaron su estructura ( $\eta_0$  se mantuvo constante). La mezcla GX/GG presentó una menor  $\eta_0$  que GX, permitiendo la reorganización de las gotas de aceite durante el almacenamiento, con un consecuente aumento de la viscosidad de la emulsión.

### Comportamiento viscoelástico de las dispersiones y emulsiones analizadas

Las dispersiones acuosas con GX/GG evidenciaron bajos valores de los módulos elástico y viscoso, con una marcada dependencia de los mismos con la frecuencia.  $G''$  fue mayor que  $G'$  hasta una cierta frecuencia característica  $\omega_c$  a partir de la cual ambas curvas se cruzaron ( $G' > G''$ ) [7]. Las fases continuas conteniendo AP/GX, y en menor medida las de GX, presentaron un comportamiento tipo gel, con una baja dependencia de  $G'$  y  $G''$  con  $\omega$ , asociado a la presencia de una estructura tridimensional causada por el entrecruzamiento de cadenas poliméricas [7] (**Figura 2a**).



**Figura 2.** Barridos de frecuencias para: (a) Fases continuas con distintos hidrocoloides al tiempo inicial (b) emulsiones con 20% de aceite y fases continuas conteniendo almidón de papa y goma xántica a tiempo inicial y luego de 14 días de almacenamiento.

En el caso de las emulsiones se puede proponer la existencia de una red tridimensional de moléculas de carbohidratos entrelazadas o interactuando, que atrapan las gotas de aceite; la estructura de estos sistemas estaría reforzada por la reversible atracción por depleción entre gotas de aceite adyacentes. Las emulsiones estabilizadas con GX o AP/GX no sufrieron cambios durante el almacenamiento (**Figura 2b**), lo que puede atribuirse a la rigidez estructural y a la naturaleza extendida de las moléculas de goma xántica [3,8]. Por otra parte, las emulsiones formuladas con GX/GG aumentaron sus características elásticas durante el almacenamiento, lo que coincide con lo observado en el ensayo rotacional.

Un material viscoelástico muestra retardo de la deformación y relajación del esfuerzo, dependiendo de la excitación. El espectro de un material caracteriza su comportamiento mecánico representado por las funciones viscoelásticas lineales. El conocimiento del espectro permite el cálculo de unas funciones viscoelásticas a partir de otras, lo que hace versátil su utilización. Por otra parte, el espectro de un material no es una función medible

experimentalmente, por lo que se tiene que calcular a partir de valores experimentales de las funciones viscoelásticas lineales, las cuales sí son accesibles experimentalmente.

El comportamiento viscoelástico de las emulsiones y las fases continuas estudiadas se describió utilizando el modelo generalizado de Maxwell [7], para lo cual se estimaron los módulos de relajación  $G_i$  y sus correspondientes tiempos de relajación  $\lambda_i$ .

El excelente ajuste obtenido se puede apreciar en la **Figura 2**. Una de las funciones materiales calculadas a partir del espectro de relajación de las fases continuas y emulsiones estudiadas fue la capacitancia en estado estacionario ( $J_e^0$ ) de acuerdo a las ecuaciones descritas en Ferry [7]. El mismo fue siempre mayor para las fases continuas que para sus respectivas emulsiones o/w, ya que este parámetro corresponde a la región donde las uniones entre distintas unidades estructurales de los sistemas son estirados elásticamente. La presencia de las gotas de aceite refuerza la estructura de la matriz como se observó en los resultados obtenidos mediante curvas de flujo.

## CONCLUSIONES

Se estudió el efecto de dispersiones de goma xántica sola y en mezclas con almidón de papa o goma guar sobre la viscosidad y propiedades viscoelásticas de emulsiones alimentarias o/w en presencia de NaCl y en pH ácido y sus cambios durante el almacenamiento.

Se observó que el incremento en el contenido de aceite, produjo un aumento en las características elásticas del sistema y en el valor de  $\eta_0$  independientemente del tipo de hidrocoloide utilizado. El tiempo de almacenamiento afectó a la dispersión de almidón de papa/xántica produciendo un reordenamiento de su estructura debido a la retrogradación del almidón. Sin embargo, en presencia de las gotas de aceite este fenómeno se vio impedido y no se registraron cambios en sus propiedades viscoelásticas. La distribución de tamaño de gotas no se vio modificada durante el almacenamiento y la estabilidad de las emulsiones fue superior a los seis meses, lo que muestra que la coalescencia y el cremado de las gotas estuvieron fuertemente impedidos por las mezclas de hidrocoloides utilizadas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Tadros, T. *Emulsion formation and stability*: John Wiley & Sons, NY, USA, 2013.
- [2] Lorenzo, G., Zaritzky, N., Califano, A., "Rheological analysis of emulsion-filled gels based on high acyl gellan gum". *Food Hydrocolloids*, Volumen 30, 672-680, 2013.
- [3] Quintana, J., Califano, A.N., Zaritzky, N.E., Partal, P., Franco, J.M., "Linear and nonlinear viscoelastic behavior of oil-in-water emulsions stabilized with polysaccharides". *Journal of Texture Studies*, Volumen 33, 215-236, 2002.
- [4] McClements, D. *Food emulsions: Principles, practices, and techniques (3rd ed.)*. CRC press, Boca Raton, USA, 2015.
- [5] Quintana, J., Lorenzo, G., Zaritzky, N., Califano, A., "Hydrocolloids as o/w emulsion stabilizers: Effect of the structural features during storage". In C. E. Lupano (Ed.), *Functional properties of food components* (pp. 1-22). Research Signpost, 2007.
- [6] Launay, B., Doublier, J., Cuvelier, G., "Flow properties of aqueous solutions and dispersions of polysaccharides". In J. Mitchell & D. Ledward (Eds.), *Functional properties of food macromolecules* (pp. 1-78). Elsevier, 1985.
- [7] Ferry, J.D. *Viscoelastic properties of polymers*. John Wiley & Sons, NY, USA, 1980.
- [8] Chivero, P., Gohtani, S., Yoshii, H., Nakamura, A., "Effect of xanthan and guar gums on the formation and stability of soy soluble polysaccharide oil-in-water emulsions". *Food Research International*, Volumen 70, 7-14, 2015.

## ENSAMBLADO DE MATRICES DE QUITOSANO CON NANOPARTÍCULAS FUNCIONALIZADAS CON ÁCIDO GÁLICO

Lamarra, J.<sup>1</sup>; Lecot, J.<sup>1</sup>; Rivero, S.<sup>1</sup>; Pinotti, A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), CONICET-CIC, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, UNLP, La Plata (1900), Argentina  
e-mail: [jlamarra11@gmail.com](mailto:jlamarra11@gmail.com)

### INTRODUCCION

El quitosano (Q) es un poliaminosácarido lineal compuesto por unidades monoméricas, N-acetil glucosamina y D-glucosamina, unidas a través de enlaces glucosídicos  $\beta$ -(1-4). Este polímero tiene grupos amino sumamente reactivos en su estructura que permite modificar su funcionalidad mediante la incorporación de compuestos activos como el ácido gálico (AG) o la síntesis de nano-y micropartículas (Liu et al. 2015).

El ácido gálico (ácido 3,4,5-trihidroxibenzoico) puede ser extraído de la nuez moscada, hojas de té, corteza de robles y otras plantas (Alkan et al. 2011). Posee diferentes propiedades biológicas como agente antiinflamatorio, antimutagénico y antioxidante (Giftson et al. 2010). Además, usado como entrecruzante, es capaz de modificar las propiedades mecánicas de materiales basados en polímeros naturales, permitiendo su uso en envases para alimentos (Sun et al. 2014).

El desarrollo de estrategias de preservación de los compuestos fenólicos que aseguren una viabilidad adecuada en el producto final es objeto de estudio en las industrias de alimentos y farmacéutica. La encapsulación de extractos y compuestos fenólicos constituye una estrategia de preservación de compuestos activos y un modo eficiente de incorporarlos es una matriz soporte (Stoll et al. 2015), facilitando su manejo y mejorando su estabilidad (Yousuf et al. 2015). Específicamente, por medio del empleo de la nanotecnología, nuevas formas de soportes poliméricos incorporando nanopartículas cargadas pueden ser desarrolladas para adaptar sus propiedades y modular la liberación de compuestos activos (de Moura et al. 2010). Según Merino et al. (2015) la combinación de una matriz polimérica con nanopartículas podría superar las limitaciones y desventajas asociadas con el empleo de nanopartículas aisladas como sistemas de liberación. Como fue descripto por Sugita et al. (2013), las ventajas principales de usar nanoestructuras como sistemas de liberación están relacionados con la posibilidad de incluir aditivos en las nanopartículas sin reacciones químicas, controlar y modular la liberación de compuestos activos, así como ajustar el diseño de las nanopartículas de acuerdo a su potencial uso.

Los objetivos de trabajo fueron: a) sintetizar nanopartículas a base de quitosano, funcionalizadas con ácido gálico; b) incluir las nanopartículas previamente sintetizadas en una matriz soporte de quitosano variando la relación nanopartícula:quitosano (N:Q); c) evaluar distintas propiedades de las películas formadas.

### Parte experimental

#### Materiales

Se usó quitosano (Q) proveniente de caparazones de cangrejos con un grado de desacetilación de 85% y un peso molecular de  $4,8 \times 10^4$  Da suministrado por Polymar Ciência e Nutrição (Fortaleza, Brasil). Tripolifosfato sódico de grado analítico (TPP), ácido gálico (AG) y ácido acético fueron adquiridos a Anedra (Buenos Aires, Argentina).

### *Síntesis de nanopartículas de quitosano*

Las suspensiones de nanopartículas se prepararon por el método de gelificación ionotrópica propuesto por *Calvo et al. (1997)* con algunas modificaciones. Las nanopartículas se formaron espontáneamente por adición gota a gota del TPP a una solución de Q funcionalizada con AG. Una vez finalizado este proceso, las suspensiones obtenidas fueron homogeneizadas a 13.500 rpm durante 10 min mediante un Ultraturax T-25 (Janke y Kunkel, IKA-Labortechnik, Alemania). Las formulaciones se prepararon con concentraciones de Q 0,75% (p/v) y AG 50 mg AG/g Q, difiriendo únicamente en la relación de concentraciones de Q:TPP. Estas relaciones fueron 5 y 3, las cuales se denominaron  $N_A$  y  $N_B$  respectivamente. Las formulaciones fueron seleccionadas en base a un diseño central compuesto, a partir del cual se obtuvieron los valores óptimos (*Lamarra et al. 2016*).

### *Preparación de soluciones filmogénicas*

Se preparó una solución de Q al 1,5% (p/v) por solubilización en ácido acético bajo agitación continua durante 24 h, seguida por una centrifugación a 7.000 rpm para eliminar el material insoluble presente. Para la formulación de las matrices nanocompuestas, diferentes proporciones de la suspensión de nanopartículas ( $N_A$  y  $N_B$ ) se incorporaron y dispersaron en la solución de quitosano obteniendo las relaciones N:Q: 1:2, 1:1 y 2:1 (v/v). Las películas nanocompuestas de quitosano fueron obtenidas por moldeo en placas de acrílico y secado a 37°C durante aproximadamente 18 h.

### *Análisis mecánico*

Para estudiar las propiedades mecánicas de las películas nanocompuestas se utilizó un texturómetro TA.XT2i-Stable Micro Systems (Inglaterra). Sobre muestras de 6 cm de longitud y 0,7 cm de ancho se determinaron el esfuerzo (MPa) y el porcentaje de elongación (%). Los ensayos se llevaron a cabo utilizando un sistema de tensión A/TG a una velocidad constante de 1 cm s<sup>-1</sup>. Las curvas de fuerza (N) en función de la deformación (mm) fueron graficadas por medio del software Texture Expert Exceed.

### *Espectroscopia de Infrarrojo por transformada de Fourier*

Para estudiar las interacciones establecidas entre los grupos funcionales de las nanopartículas y la matriz soporte se utilizó un equipo de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (Nicolet, iS10 Thermo Scientific, Madison, USA) en el modo de reflectancia total atenuada (ATR). Los datos registrados en el rango de 400-4000 cm<sup>-1</sup> por acumulación de 64 scans con una resolución de 4 cm<sup>-1</sup> fueron analizados usando el software Omnic 8 (Thermo Scientific). La deconvolución espectral de la datos se realizó utilizando algoritmos de ajuste de la curva en la región 1700-1500 cm<sup>-1</sup>. Se realizó la segunda derivada de los espectros para estimar el número, la posición y la contribución relativa de los elementos individuales de la amida I y amida II.

### *Difracción de rayos X*

Las películas formadas a base de quitosano fueron analizadas por difracción de rayos X usando un equipo Philips PW 3710, X'Pert Pro P Analytical ModelPW3040/60 (Almelo, Países Bajos). Se operó con radiación CuK (1.542 Å) a temperatura ambiente a 40 kV y 30 mA. La intensidad relativa fue registrada en el rango de (2θ) 3-60°. La relación del área del pico cristalino ( $A_p$ ) respecto del área total del difractograma ( $A_t$ ) se usó para determinar el grado de cristalinidad como se describe en la siguiente ecuación:



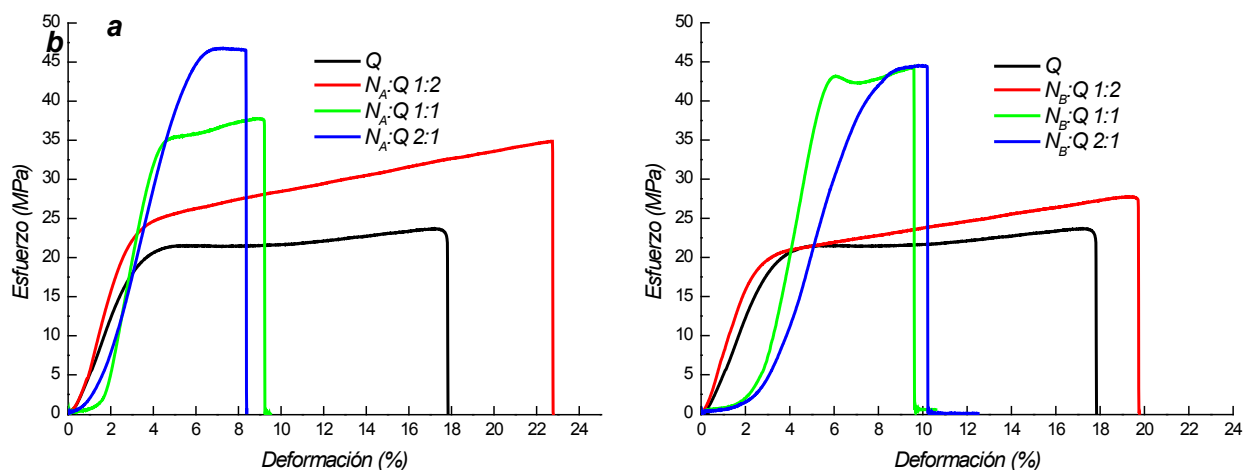
$$GC(\%) = \frac{Ap}{At} \times 100$$

### Análisis estadístico

Para el análisis de los resultados obtenidos se empleó el test de comparación de medias de Fisher (LSD) y análisis de varianza (ANOVA), utilizando el paquete estadístico Systat (versión 10, USA), con un nivel de significación de 0,05.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se puede observar en la Figuras 1a y b, el agregado de la menor proporción de nanopartículas (relación 1:2) no generó cambios significativos ( $p > 0,05$ ) en las propiedades mecánicas de las películas. Sin embargo, con la incorporación de proporciones crecientes a la matriz de quitosano se obtuvo un aumento en el esfuerzo y una disminución en la elongación (Tabla 1). Este hecho podría atribuirse a la reducción del volumen libre existente entre las cadenas del polímero provocado por el aumento de las fuerzas de interacción entre las mismas generando así una red polimérica interconectada y más compacta (Hosseini et al. 2015). Resultados similares fueron informados por Sanuja et al. (2015) quienes encontraron que al aumentar la concentración de nanopartículas de ZnO incluidas, las películas de quitosano experimentaron un incremento en el valor de esfuerzo.



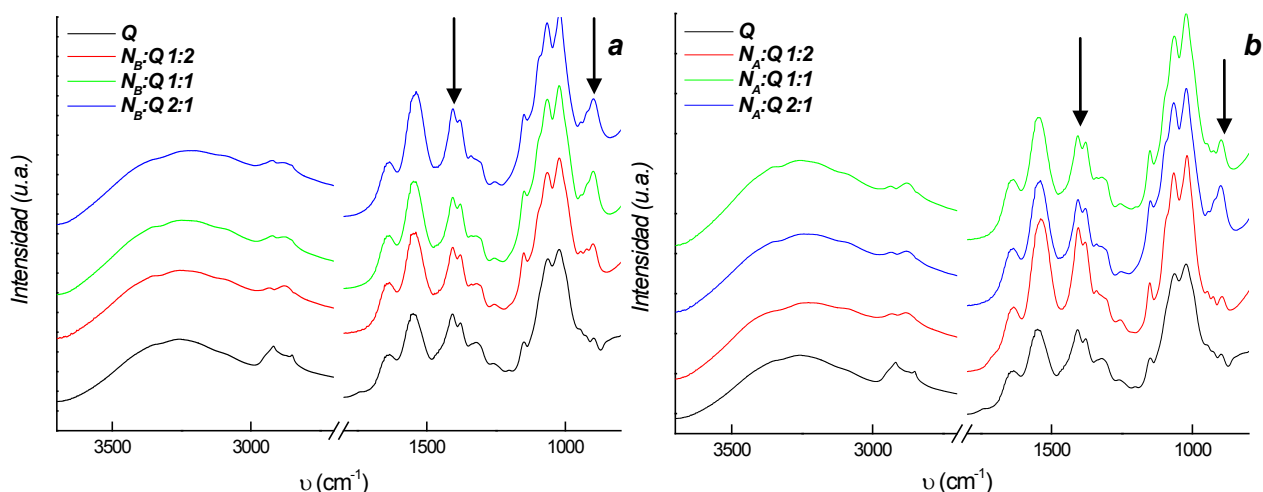
**Figura 1:** Perfiles mecánicos de películas a base de quitosano con diferentes proporciones de suspensión de nanopartículas: a)  $N_A$ , b)  $N_B$ .

**Tabla 1:** Esfuerzo máximo y elongación en la ruptura de las matrices de Q y las distintas formulaciones nanocompuestas\* con sus respectivas desviaciones estándar

Muestra	Esfuerzo (MPa)	Elongación en la ruptura (%)
Q	24,2 (0,8) <sup>a</sup>	18,3 (2,9) <sup>a</sup>
N <sub>A</sub> :Q 1:2	32,9 (3,2) <sup>b</sup>	26,0 (5,5) <sup>b</sup>
N <sub>A</sub> :Q 1:1	34,3 (2,7) <sup>b</sup>	14,9 (0,8) <sup>c</sup>
N <sub>A</sub> :Q 2:1	45,3 (3,1) <sup>c</sup>	8,3 (1,0) <sup>d</sup>
N <sub>B</sub> :Q 1:2	26,2 (2,9) <sup>a</sup>	18,7 (1,7) <sup>a</sup>
N <sub>B</sub> :Q 1:1	51,4 (4,2) <sup>d</sup>	8,4 (1,2) <sup>d</sup>
N <sub>B</sub> :Q 2:1	45,3 (3,1) <sup>c</sup>	9,8 (0,6) <sup>d</sup>

\*Subíndices diferentes en una misma columna representan diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre las muestras.

Para estudiar las interacciones entre los distintos componentes de las películas nanocompuestas se utilizó la técnica de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier en el modo ATR. En la Figura 2 se visualiza la presencia de un pico ubicado a  $900\text{ cm}^{-1}$  atribuido al estiramiento P=O del polianión tripolifosfato, indicando su presencia en la matriz. En ambas formulaciones se pudo observar que al aumentar la proporción de suspensión de nanopartículas, la intensidad del pico se incrementó significativamente. No obstante, esta tendencia resultó más acentuada para las matrices nanocompuestas con nanopartículas N<sub>B</sub>. Para mejorar la resolución espectral se recurrieron a técnicas matemáticas como la deconvolución de los picos pertenecientes a la amida I (estiramiento C=O) y a la amida II (bending N-H). Del análisis se evidenció, la conformación de un pico en la banda de la amida I y dos picos en la amida II. En este último caso se observó un corrimiento hacia menores números de onda de uno de los picos con respecto al quitosano, lo que indicaría la existencia de interacciones entre los grupos amino del quitosano y los fosfatos del tripolifosfato.

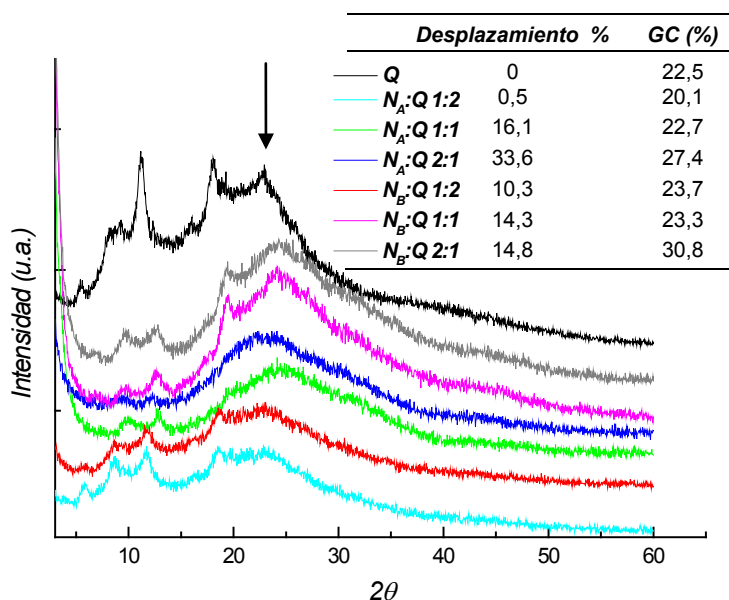
**Figura 2:** Espectros FTIR-ATR de películas a base de quitosano con diferentes proporciones de suspensión de nanopartículas: a) N<sub>A</sub>, b) N<sub>B</sub>.

Con el objetivo de analizar el cambio en la cristalinidad de las distintas películas nanocompuestas se realizaron los espectros de difracción de rayos X, cuyos resultados se

resumen en la Figura 3. Se observa que al aumentar la proporción de nanopartículas incorporadas a la matriz de quitosano se incrementó el área del pico centrado a  $22^\circ$  asignado a las cadenas de quitosano alineadas a través de interacciones intermoleculares (Yu *et al.* 2013) (Tabla inserta Figura 3). Estos cambios podrían atribuirse al aumento en el contenido de nanopartículas, con el consiguiente incremento en la concentración de compuestos con características cristalinas como el AG y TPP.

Resultados similares fueron observados por Yu *et al.* (2013) quienes registraron un aumento en la cristalinidad al aumentar el contenido de TPP en muestras a base de quitosano. El grado de cristalinidad se muestra en la Tabla inserta en la Figura 3, siendo las muestras con mayor proporción de suspensión de nanopartículas ( $N_A$  y  $N_B:Q$  2:1) las que evidenciaron mayores cambios en el GC (%). Asimismo, se observan mayores desplazamientos del pico centrado a  $2\theta = 22^\circ$  presente en la muestra control, confirmando el cambio en la estructura de la matriz.

La modificación en el grado de cristalinidad se correlacionó con los valores de esfuerzo obtenidos a partir de los patrones mecánicos.



**Figura 3:** Espectros de difracción de rayos X de las películas a base de quitosano con diferentes proporciones de suspensión de nanopartículas

## CONCLUSIONES

La inclusión de nanopartículas generó matrices con mejores propiedades mecánicas manifestadas por la obtención de un mayor valor de esfuerzo a medida que se incrementó la proporción incorporada a la matriz de quitosano, en correspondencia con el aumento de la cristalinidad de los nanocompuestos. Las interacciones establecidas debido a la presencia de nanopartículas incluidas en la matriz soporte también pudo evidenciarse por ATR, observándose modificaciones en los espectros respecto del control de quitosano. Así, los materiales formulados tienen un potencial aplicación en el campo de conservación de productos alimenticios en virtud de la presencia de ácido gálico, compuesto con reconocidas propiedades antioxidantes y antimicrobianas.

## Referencias

Alkan, D., Aydemir, L.Y., Arcan, I., Yavuzdurmaz, H., Atabay, H.I., Ceylan, C., Yemenicioglu, A. (2011). Development of flexible antimicrobial packaging materials against *Campylobacter jejuni* by incorporation of gallic acid into zein-based films. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(20), 11003-11010.

Calvo, P., Remunan-Lopez, C., Vila-Jato, J.L., Alonso, M.J. (1997). Novel hydrophilic chitosan-polyethylene oxide nanoparticles as protein carriers. *Journal of Applied Polymer Science*, 63(1), 125-132.

de Moura, M.R., Aouada, F.A., Avena-Bustillos, R.J., McHugh, T.H., Krochta, J.M., Mattoso, L. H. (2009). Improved barrier and mechanical properties of novel hydroxypropyl methylcellulose edible films with chitosan/tripolyphosphate nanoparticles. *Journal of Food Engineering*, 92, 448-453.

Giftson, J.S., Jayanthi, S., Nalini, N. (2010). Chemopreventive efficacy of gallic acid, an antioxidant and anticarcinogenic polyphenol, against 1,2-dimethyl hydrazine induced rat colon carcinogenesis. *Investigational New Drugs*, 28, 251-259.

Hosseini S.F., Rezaei M., Zandi M., Farahmandghavi F. (2015). Fabrication of bio nanocomposite films based on fish gelatin reinforced with chitosan nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 44, 172-182.

Lamarra, J., Rivero, S., Pinotti, A. (2016). Design of chitosan-based nanoparticles functionalized with gallic acid. *Materials Science and Engineering C*, 67, 717-726.

Liu, F., Antoniou, J., Li, Y., Yi, J., Yokoyama, W., Ma, J., Zhong, F. (2015). Preparation of gelatin films Incorporated with tea polyphenol nanoparticles for enhancing controlled-release antioxidant properties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(15), 3987-3995.

Merino, S., Martín, C., Kostarelos, K., Prato, M., Vázquez, E. (2015). Nanocomposite hydrogels: 3D polymer-nanoparticle synergies for on-demand drug delivery. *ACS nano*, 9, 4686-4697.

Sanuja S, Agalya A., Umapathy M.J. (2015). Synthesis and characterization of zinc oxide-neem oil-chitosan bionanocomposite for food packaging application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 74, 76-84.

Stoll, L., Costa, T. M., Jablonski, A., Flôres, S. H., de Oliveira Rios, A. (2016). Microencapsulation of anthocyanins with different wall materials and its application in active biodegradable films. *Food and Bioprocess Technology*, 9(1), 172-181.

Sugita, P., Ambarsari, L., Sari, Y.A., Nugraha, Y. (2013). Ketoprofen encapsulation optimization with chitosan-alginate cross-linked with sodium tripolyphosphate and its release mechanism determination using in vitro dissolution. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 14(1), 141-149.

Sun, Y., Liu, Y., Li, Y., Lv, M., Li, P., Xu, H., Wang, L. (2011). Preparation and characterization of novel curdlan/chitosan blending membranes for antibacterial applications. *Carbohydrate Polymers*, 84(3), 952-959.

Yousuf, B., Gul, K., Wani, A. A., Singh, P. (2015). Health benefits of anthocyanins and their encapsulation for potential use in food systems: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*. DOI: 10.1080/10408398.2013.805316.

Yu S-H., Wu S-J., Wu J-Y., Peng C-K., Mi F-L. (2013). Tripolyphosphate cross-linked macromolecular composites for the growth of shape- and size-controlled apatites. *Molecules*, 18, 27-40.

## PROPIEDADES FUNCIONALES DE PELÍCULAS NANOCOMPUESTAS A BASE DE QUITOSANO

Marín-Silva, Diego<sup>1,2</sup>, Rivero, Sandra<sup>1</sup>.; Pinotti, Adriana<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), CONICET-CIC, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería, UNLP, La Plata (1900), Argentina  
[dm.alejandrosilva@live.com](mailto:dm.alejandrosilva@live.com)

### INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de recursos naturales renovables para la obtención de películas biodegradables representa una opción viable para el desarrollo de envases y la preservación del medio ambiente. Si bien los polímeros sintéticos ofrecen ventajas sobre los derivados naturales que pueden ser diseñados en función de las propiedades requeridas (*Middleton y Tipton, 2000; Thombre y Sarwade, 2005*), los polímeros naturales cubren un segmento importante de la investigación, en virtud de ventajas tales como biocompatibilidad, y factibilidad de ser modificados químicamente. El quitosano (Q) es un biopolímero derivado de la quitina, subproducto de la industria pesquera con capacidad de formar películas. La presencia de grupos amino distribuidos en la cadena polimérica ha hecho del Q uno de los polímeros más versátiles, por la posibilidad de realizar una amplia variedad de modificaciones químicas o físicas.

Por otra parte la celulosa es el polisacárido más abundante en la naturaleza, encontrándose principalmente en las paredes celulares de las plantas como material estructural (*Funami et al. 2007*). Es un polímero de alto peso molecular cuyas cadenas tienen tendencia a formar agregados ordenados, como consecuencia de su constitución química y de su capacidad para formar enlaces de hidrógeno inter e intramoleculares entre los grupos hidroxilo de las unidades de anhidroglucosa. Los enlaces de hidrógeno son los responsables de la alta cohesión molecular en la celulosa, lo que aparejado a la ausencia de ramificaciones, permite que las cadenas puedan alinearse en grupos, formando zonas ordenadas (cristalinas) unidas a regiones desordenadas (amorfos). Estas características limitan sus aplicaciones, motivo por el que se la modifica químicamente para hacerlo soluble y conferirle diversas propiedades de acuerdo al tipo de derivatización realizada (*Park y Ruckenstein, 2001*). Las nanocelulosas (NCC) se pueden sintetizar a partir de celulosa microcristalina (MCC) mediante la remoción de las regiones amorfas de las fibrillas de celulosa en medio ácido. La mezcla de biopolímeros como el Q y NCC da origen a los nanocompuestos, materiales formados por dos o más fases donde al menos una de sus tres dimensiones se encuentra en escala nanométrica. Las matrices nanocompuestas a base de quitosano y NCC como fase de relleno constituyen una alternativa interesante considerando su similitud estructural. En este contexto, los objetivos del trabajo fueron: i) aislar y caracterizar nanocristales de celulosa mediante hidrólisis ácida optimizando las condiciones del proceso; ii) incluir las NCC en matrices a base de quitosano estudiando sus propiedades de barrera, mecánicas y microestructurales.

### PARTE EXPERIMENTAL

#### *Elaboración de las nanofibras de nanocelulosa*

Las nanofibras de celulosa (NCC) fueron obtenidas por hidrólisis ácida de la MCC usando H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> con una concentración de 60% (p/p) y variando el tiempo de tratamiento (60, 120 y 180 min a una temperatura controlada de 45°C). La remoción del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y el aislamiento de las NCC se realizaron luego de sucesivas etapas de centrifugado (12000 rpm), lavado de la muestra con agua destilada y finalmente un proceso de diálisis de la suspensión de nanocelulosa para facilitar la desulfonación de las nanopartículas y alcanzar un pH entre 5-6. La suspensión se trató con un procesador ultrasónico (Vibra CellSonic Modelo VCX750) para minimizar la agregación de las partículas.



### *Solución filmogénica y películas nanocompuestas*

La solución filmogénica de Q se preparó por solubilización de polvo de Q 2% (p/p) en ácido acético 1,5% (v/v). Las soluciones nanocompuestas de Q se obtuvieron dispersando diferentes concentraciones de nanocelulosas (0,1, 0,25, 0,5 y 0,75% (p/p) NCC) en la solución de Q. Las muestras se homogeneizaron utilizando el equipo sonicador antes mencionado. Las películas se obtuvieron por moldeo y secado a 37 °C durante 12 horas.

### *Caracterización de las películas nanocompuestas*

El tamaño de partículas de las NCC se determinó por medio de un equipo Zetasizer Nano-ZS (Malvern). La caracterización morfológica de estas nanocelulosas se realizó por microscopía electrónica de transmisión (TEM) para las suspensiones que fueron tratadas durante diferentes tiempos de hidrólisis. La solubilidad y el contenido de humedad de las películas fueron determinadas por inmersión de las muestras en agua durante 1 h de acuerdo al protocolo descrito por *Rivero et al.* (2013).

La permeabilidad al vapor de agua (PVA) se determinó según el método descrito por *Rivero et al.* (2013). Las propiedades de barrera al oxígeno (PO<sub>2</sub>) fueron medidas usando un MOCON OX-TRAN Modelo 2/21 (Minneapolis, USA). El espesor se cuantificó usando un medidor de espesor Digital meter Microprocessor CM-8822. El esfuerzo (MPa) y la elongación a la ruptura (%) de las películas nanocompuestas se determinaron usando un Texturómetro TA.XT2i–Stable Micro Systems (Surrey, Inglaterra). Para determinar la temperatura de transición vítrea (T<sub>g</sub>) de los materiales se realizaron ensayos mediante análisis mecánico dinámico usando un DMA Q800 (TA Instruments, New Castle, EE.UU). El análisis microestructural fue llevado a cabo por microscopía electrónica de barrido (SEM, FEI m Quanta 200). Adicionalmente las películas se caracterizaron usando la técnica de FTIR (Nicolet, iS10 ThermoScientific).

### *Análisis estadístico*

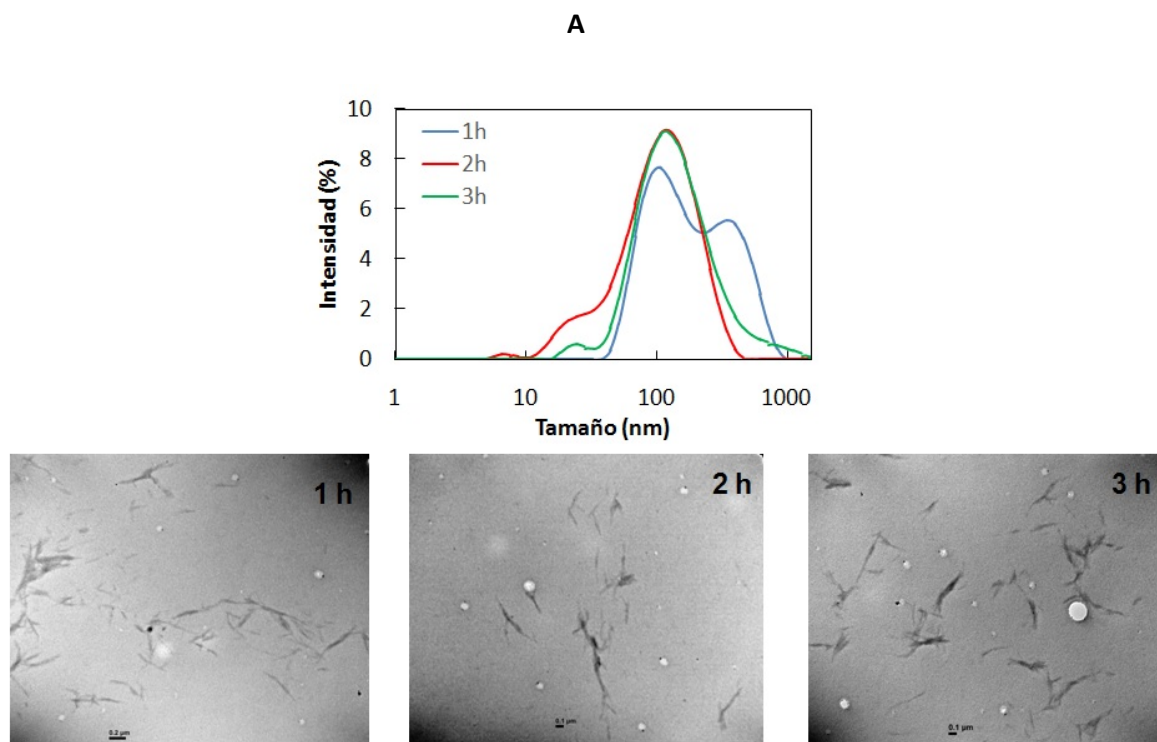
Para el análisis de los resultados obtenidos se empleó el test de comparación de medias de Fisher (LSD) y análisis de varianza (ANOVA), utilizando el paquete estadístico Systat (versión 10, USA), con un nivel de significación de 0,05.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### *Caracterización de las nanocelulosas*

La determinación del tamaño de las partículas de las NCC obtenidas revelaron que con el aumento del tiempo de hidrólisis (60, 120 y 180 min) se obtuvieron partículas de menor tamaño centrándose la distribución alrededor de 100 nm, como consecuencia del ataque ácido experimentado por las regiones amorfas presentes en la MCC. Estos resultados se correlacionaron con el análisis morfológico de las suspensiones de NCC realizado por TEM (**Figura 1A y B**).

Dado que las áreas analizadas fueron muy pequeñas en comparación con el área total de la muestra, los resultados obtenidos por TEM deben considerarse como una estimación aproximada del tamaño real de las NCC (**Figura 1A y B**). Al aumentar el tiempo de hidrólisis se observó una tendencia a la disminución en la longitud de NCC. Similares resultados fueron informados por *Azizi et al.* (2005). *Martínez-Sanz et al.* (2011) informaron que el acortamiento de las NCC resultó más evidente al aumentar el tiempo de hidrólisis y que tratamientos prolongados con ácidos fuertes condujeron a materiales con una mayor cristalinidad. Por otra parte, a partir de la determinación del potencial zeta de las NCC se obtuvo un valor promedio de -72,8 mV, independientemente del tiempo de tratamiento.



**Figura 1. A** Distribución de tamaño de partícula de la suspensión de MCC; **B** Imágenes obtenidas por TEM de muestras hidrolizadas durante 1, 2, y 3 h.

#### Propiedades fisicoquímicas de las películas nanocompuestas

Las películas nanocompuestas formuladas a partir de la suspensión Q-NCC presentaron espesores en el rango 70-100  $\mu\text{m}$ . La solubilidad de las muestras disminuyó significativamente ( $p < 0,05$ ) con el incremento en el contenido de NCC, mantenido su integridad estructural en todas las concentraciones.

**Tabla 1.** Propiedades fisicoquímicas de las películas de quitosano (Q) con diferentes concentraciones de nanocelulosa obtenidas luego de la hidrólisis.

Formulaciones	Humedad ( $\frac{\text{g}_{\text{AGUA}}}{100 \text{ g}_{\text{PELÍCULA SECA}}}$ )	Solubilidad (%)	$\text{PO}_2 \times 10^{14}$ ( $\text{cc s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ )	$\text{PVA} \times 10^{11}$ ( $\text{g s}^{-1} \text{ m}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ )
Q	19,04 <sup>a</sup>	58,54 <sup>a*</sup>	7,27 <sup>a</sup>	8,98 <sup>a</sup>
Q-NCC 0.1%	22,79 <sup>b</sup>	67,35 <sup>b</sup>	6,16 <sup>b</sup>	7,42 <sup>b</sup>
Q-NCC 0.25%	20,74 <sup>c</sup>	61,95 <sup>a</sup>	6,38 <sup>b</sup>	8,45 <sup>a</sup>
Q-NCC 0.5%	21,50 <sup>d</sup>	49,43 <sup>d</sup>	4,92 <sup>c</sup>	6,76 <sup>c</sup>
Q-NCC 0.75%	21,11 <sup>d</sup>	36,01 <sup>c</sup>	6,30 <sup>b</sup>	7,67 <sup>b</sup>

\*Los valores entre paréntesis corresponden a la desviación estándar de las medidas. Letras diferentes en la misma columna muestran diferencias significativas usando el test de comparación de Fisher ( $p < 0,05$ ).

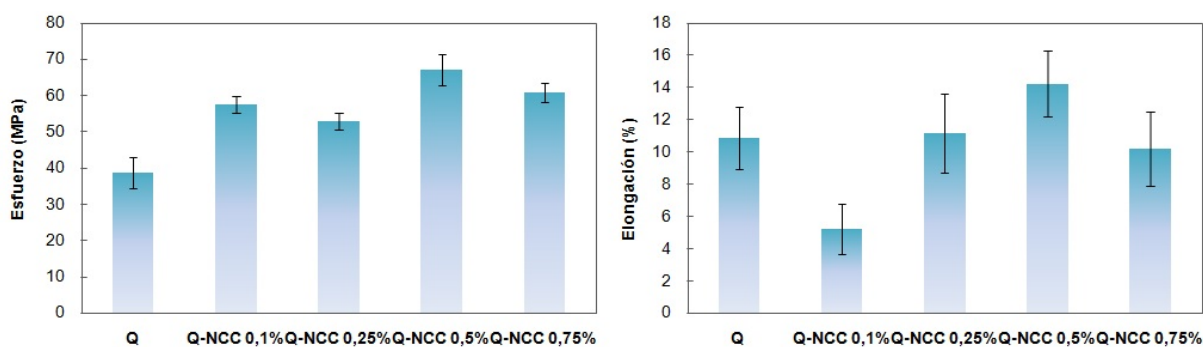
Como se observa en la **Tabla 1** con el incremento de la concentración de NCC de 0,1% a 0,25%, el contenido de humedad aumentó con respecto al control, con una posterior disminución no significativa ( $p > 0,05$ ) para el caso de la formulación NCC 0,5%. Asimismo, las películas nanocompuestas de Q presentaron una disminución de la permeabilidad al vapor de agua alcanzando un mínimo para la concentración de 0,5% ( $6,76 \times 10^{-11} \text{ g m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ ). La presencia de NCC en las matrices de Q posibilitó la disminución de la  $\text{PO}_2$  y la PVA como consecuencia del aumento de la tortuosidad y la consiguiente restricción a la transferencia de materia a través de la matriz (**Tabla 1**). Independientemente de la

concentración de NCC incorporada, las formulaciones presentaron diferencias significativas con respecto al control Q ( $p < 0,05$ ) (de Moura, et al. 2009).

### Propiedades mecánicas de las películas nanocompuestas

Los resultados de las propiedades mecánicas para las películas con agregado de NCC se presentan en la **Figura 2**, donde se puede evidenciar el aumento del esfuerzo (MPa) a medida que aumentó la proporción de NCC. A partir de estos resultados podría inferirse que el quitosano por sus características estructurales de polielectrolito catiónico es capaz de unirse a las NCC mediante interacciones electrostáticas formando complejos iónicos estables con la consiguiente mejora en las propiedades mecánicas

Por otro lado, la formulación conteniendo 0,75% de NCC presentó una disminución del % elongación con respecto a las otras formulaciones, debido a que el aumento de NCC generó películas significativamente más rígidas ( $p < 0,05$ ) debido al mayor grado de asociación entre las partículas y la matriz de Q. Este parámetro guarda una estrecha relación con el contenido de humedad (**Tabla 1**).

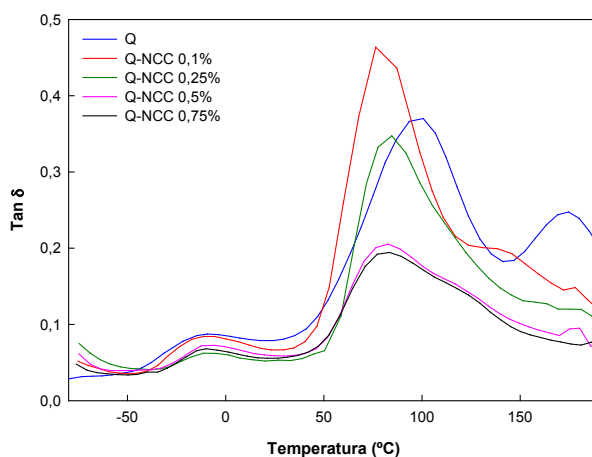


**Figura 2.** Propiedades mecánicas de películas de quitosano (Q) con agregado de nanofibras de celulosa (NCC) obtenidas luego de 2 h de hidrólisis.

\*Las barras de error corresponden a la desviación estándar; letras diferentes indican diferencia significativa usando el test de comparación de Fisher ( $p < 0,05$ ),  $n=6$

### Propiedades termo-físicas de las películas nanocompuestas

Los espectros dinámicos mecánicos de las películas de Q mostraron una ligera disminución de la  $T_g$  con el agregado de NCC con respecto a las películas de Q. La **Figura 3** muestra la relajación  $\alpha$  asociada a la temperatura de transición vítrea  $T_g$  como se observa en las curvas de  $\tan \delta$  (factor de pérdida) en función de la temperatura para las películas a base de Q. El valor máximo del factor de pérdida disminuyó con el aumento de la concentración de NCC, siendo 0,46, 0,34, 0,21 y 0,19, para NCC 0,1, 0,25, 0,5 y 0,75%, respectivamente.

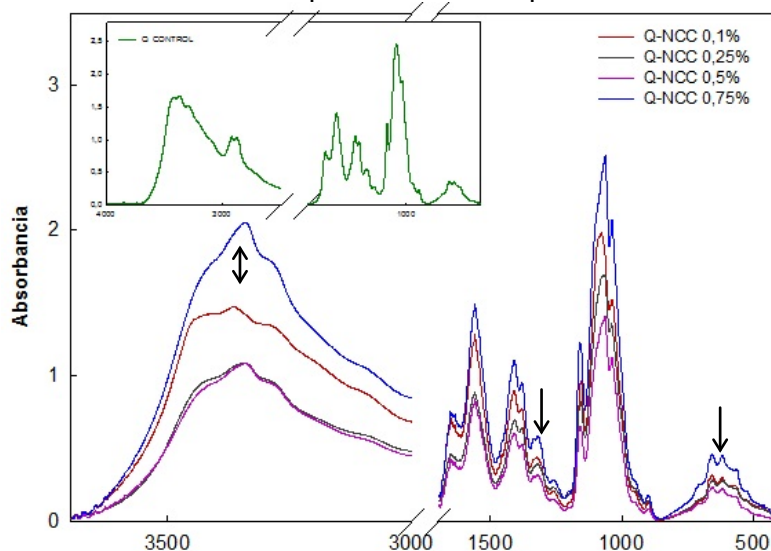


**Figura 3.** Espectros dinámicos mecánicos de las películas de quitosano (Q) con agregado de nanofibras de celulosa (NCC) obtenidos luego de 2 h de hidrólisis.

La  $\tan \delta$  o factor de pérdida está relacionada con el amortiguamiento del material y es inversamente proporcional al número de ciclos necesarios para que la amplitud de vibración decaiga un factor igual al número  $e$ . Como puede observarse en la **Figura 3**, a una temperatura dada, el aumento del porcentaje de NCC disminuyó el número de ciclos (*Lakes, 2009*). Asimismo, los espectros dinámicos mecánicos revelaron una amplia transición en las curvas de  $\tan \delta$ , lo que indicaría la dispersión de las nanocelulosas en la matriz de Q y el grado de interacción existente entre la fase dispersa y matriz soporte (**Figura 3**).

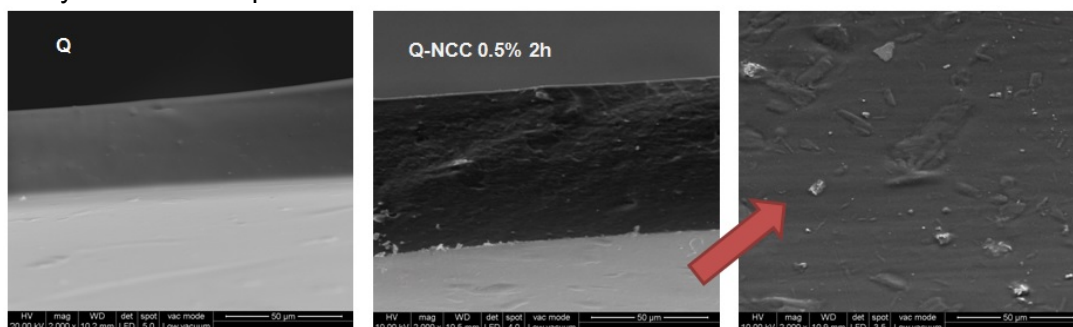
#### Propiedades microestructurales

La **Figura 4** presenta los espectros de las matrices nanocompuestas con distinta concentración de NCC. Los espectros FTIR revelaron las similitudes estructurales entre el Q y las NCC, considerando la naturaleza química de estos polímeros.



**Figura 4.** Espectro FTIR de las películas de Q con agregado de nanofibras de celulosa obtenidas luego de la hidrólisis de 2 h (NCC).

Los espectros FTIR evidenciaron en la región 3000- 3500  $\text{cm}^{-1}$  un pico agudo característico de las vibraciones O-H de las NCC. Similares resultados fueron informados por *Khan et al. (2012)*. Se detectó la aparición de una banda a 1333  $\text{cm}^{-1}$  en todas las matrices nanocompuestas intensificándose en presencia de mayor concentración de NCC. Por otra parte, los picos localizados a 1160 y 1055  $\text{cm}^{-1}$  son asignadas a los enlaces C-O, C-C de los compuestos celulósicos. Asimismo, las bandas 800 y 650  $\text{cm}^{-1}$  son adscriptas a las vibraciones de flexión de los enlaces O-H. En este sentido, *Rubentheren et al. (2015)* señalaron que estas observaciones indicarían la existencia de una buena miscibilidad entre las NCC y la matriz de quitosano.



**Figura 5.** Imágenes obtenidas a partir de SEM de la película de quitosano y la película de Q-NCC al 0,5 %

Resulta interesante también examinar la matriz desde el punto de vista de la microestructura. La técnica de SEM se utilizó para analizar las secciones transversales y la morfología de la superficie de las películas a base de Q. El análisis micro estructural indicó que tanto en la superficie como en la sección transversal se pueden visualizar la dispersión de las nanopartículas en la matriz continua de Q con una distribución homogénea.

## CONCLUSIONES

Las nanocelulosas aisladas fueron compatibles con la matriz de quitosano y su distribución en la misma resultó homogénea. Las interacciones establecidas con elementos de tamaño nanométrico fueron confirmadas por medio de la técnica de FTIR. Las mejoras en la solubilidad y en las propiedades mecánicas y de barrera se atribuyen a la formación de una red tridimensional interconectada y a las interacciones nanofibras-quitosano que determinaron las propiedades funcionales de los materiales obtenidos.

## REFERENCIAS

- Azizi Samir, M.A.S., Alloin, F., Dufresne, A. (2005). Review of recent research into cellulosic whiskers, their properties and their application in nanocomposite field. *Biomacromolecules*, 6, 612–626.
- de Moura, M.R., Aouada, F.A., Avena-Bustillos, R.J., McHugh, T.H., Krochta, J.M., Mattoso, L.H. (2009). Improved barrier and mechanical properties of novel hydroxypropyl methylcellulose edible films with chitosan/tripolyphosphate nanoparticles. *Journal of Food Engineering*, 92, 448-453.
- Funami, T., Hiroe, M., Noda, S., Asai, I., Ikeda, S., Nishinari, K. (2007). Influence of molecular structure imaged with atomic force microscopy on the rheological behavior of carrageenan aqueous system in the presence or absence of cations. *Food Hydrocolloids*, 21, 617–629.
- Khan, A., Khan, R. A., Salmieri, S., Le Tien, C., Riedl, B., Bouchard, J., Chauve, G., Tan, V., Kamal, M.R., Lacroix, M. (2012). Mechanical and barrier properties of nanocrystalline cellulose reinforced chitosan based nanocomposite films. *Carbohydrate Polymers*, 90(4), 1601-1608.
- Lakes, R.S. (2009). *Viscoelastic Materials*, Cambridge University Press 153–61.
- Lu, J., Drzal, L.T. (2010). Microfibrillated cellulose/cellulose acetate composites: effect of surface treatment. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, 48, 153–161.
- Martínez-Sanz, M., Olsson, R.T., Lopez-Rubio, A., Lagaron, J.M. (2010). Development of electrospun EVOH fibres reinforced with bacterial cellulose nanowhiskers. Part I: Characterization and method optimization. *Cellulose*, 18, 335–347.
- Middleton, J., Tipton, A. (2000). Synthetic biodegradable polymers as orthopedic devices *Biomaterials*, 21, 2335-2346.
- Ng, H-M., Sin, L.T., Tee, T-T., Bee, S-T., Hui, D., Low, C-Y., Rahmat, A-R. (2015). Extraction of cellulose nanocrystals from plant sources for application as reinforcing agent in polymers. *Composites Part B: Engineering*, 75, 176–200.
- Park, J.S, Ruckenstein, E. (2001). Viscoelastic properties of plasticized methylcellulose and chemically crosslinked methylcellulose. *Carbohydrate Polymers*, 46, 373.
- Rivero, S., Garcia, M-A., Pinotti, A. (2013). Chitosan active films developed for pastry dough conservation. *Journal of Food Engineering*, 116, 524 – 531.
- Rubentheren, V., Ward, T.A., Chee, C.Y., Nair, P. (2015). Physical and chemical reinforcement of chitosan film using nanocrystalline cellulose and tannic acid. *Cellulose*, 22(4), 2529-2541.



Thombre, S, Sarwade, B. (2007). Synthesis and biodegradability of polyaspartic acid: A critical review. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry Publication*, 42, 1299-1315.

## **PUESTA A PUNTO DE UN EQUIPO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA BASICIDAD DE CATALIZADORES METÁLICOS SOPORTADOS, MEDIANTE LA DESCOMPOSICIÓN DE ISOPROPANOL.**

Reale, Natalia R., Yarza, Florencia, Cano, Leonardo A. y Cagnoli, María Virginia

*CINDECA, CONICET, CICPBA, UNLP, Fac. Ciencias Exactas, Calle 47, N°. 257, 1900, La Plata, Argentina. Tel. +54 221 4210711; Fax. +54 221 4211353; mavic@quimica.unlp.edu.ar.*

### **INTRODUCCIÓN**

La Síntesis de Fischer–Tropsch (SFT) es un proceso industrial usado para producir hidrocarburos a partir de gas de síntesis (mezcla de  $H_2$  y  $CO$ ) [1]. Diferentes metales son activos como catalizadores en la SFT, aunque el  $Co$  y el  $Fe$  son los más usados comercialmente para este proceso [2]. Los catalizadores de  $Fe$  precipitados o fundidos se prefieren frente a los de  $Co$ , ya que, entre otras cosas, resultan más selectivos hacia alquenos. Por otro lado, el uso de catalizadores metálicos soportados en la SFT ha sido profundamente estudiado en los últimos años [3, 4]. Sin embargo un catalizador soportado, selectivo a olefinas livianas y con una aceptable actividad, es un tema aún no resuelto. Dichos catalizadores deberán tener una estrecha distribución de tamaños de cristal, condición esencial para incrementar la selectividad del catalizador [5] y una adecuada basicidad, la cual no solamente favorece la selectividad a la producción de olefinas, sino también aumenta la actividad del catalizador [6]. Una manera de obtener una distribución estrecha de tamaño de cristal de  $Fe$  consiste en localizar los cristales de  $Fe$  dentro de los canales del sólido mesoporoso. El sólido mesoporoso SBA-15 parece cumplir con todas esas condiciones ya que tiene una distribución estrecha de tamaño de cristal, con arreglo hexagonal [7], propiedades estructurales que indican que la SBA-15 es un sólido apropiado para llevar adelante los requerimientos del soporte, dado que si el hierro entra en el interior de los canales, se obtendrá una distribución estrecha de tamaños de cristal en el rango deseado. Por otro lado, el elevado espesor de pared que presenta este sólido, le confiere una alta estabilidad térmica e hidrotérmica que permite llevar adelante todos los pasos preparativos. Los metales alcalinos han sido ampliamente estudiados como promotores para aumentar la actividad y selectividad en la hidrogenación de  $CO$ , además en contacto con un metal de transición puede alterar las energías de enlace y la capacidad de adsorción de las moléculas [8]. De acuerdo con Lee y col. [9] la velocidad de disociación de  $CO$  y la dispersión del metal activo sobre el soporte se ven incrementados por la presencia de un promotor alcalino. Metales alcalinos del primer grupo de la tabla periódica, tales como:  $Li$ ,  $Na$ ,  $K$ ,  $Rb$  y  $Cs$  son los más usados como promotores en la SFT [10]. Tres cationes alcalinos,  $Li$ ,  $K$

y Cs, fueron elegidos con el propósito de dar diferente efecto promotor al catalizador de hierro. Por lo tanto se presenta la síntesis y caracterización de tres soportes mesoporosos modificados Li/SBA 15, K/SBA 15, Cs/SBA 15, los cuales serán potencialmente usados en la SFT.

El objetivo del presente trabajo consiste en preparar y caracterizar nuevos soportes de catalizadores de hierro usando promotores alcalinos, con el propósito de incrementar la actividad y selectividad en la Síntesis de Fischer-Tropsch.

## EXPERIMENTAL

### *Preparación de la muestra*

El soporte SBA-15 fue sintetizado de acuerdo a la metodología de Zhao y col. [7] usando copolímero tribloque Pluronic P123 (EO20-PO70-EO20) como agente director de la estructura y tetraetilortosilicato (TEOS) como fuente de silicio. La SBA-15 modificada con metales alcalinos fue preparada usando la misma metodología que se describió antes. La única diferencia fue que el CsNO<sub>3</sub> o KNO<sub>3</sub> o LiNO<sub>3</sub> fueron agregados con el P123 y el sólido final no fue recuperado por filtración y lavado. El agua remanente en el gel de síntesis fue eliminada por evaporación a 333K en vacío. La cantidad de metal alcalino en cada caso fue calculada en función de mantener una relación atómica M / Si = 0.0125. Los sólidos fueron denominados Li-SBA-15, K-SBA-15 y Cs-SBA-15.

### *Caracterización de las muestras*

Las muestras fueron caracterizadas por difracción de rayos (DRX) a bajos ángulos, adsorción de N<sub>2</sub> (BET), espectroscopia de absorción atómica, desorción a temperatura programada de CO<sub>2</sub> (TPD) y test de isopropanol.

La difracción de rayos X fue realizada en un equipo Shimadzu, modelo XD3A, usando radiación de Cu K $\alpha$  generada a 40 kV y 40 mA en el rango de  $2\theta = 0.5-90^\circ$  con pasos de  $0.02^\circ$ .

Las propiedades texturales, área superficial específica (Sg), volumen específico de poro (Vp) y diámetro de poro (Dp), fueron medidos en un equipo Micromeritics ASAP 2020 V1.02 E.

El contenido de metal alcalino de los sólidos fue determinado por absorción en un equipo AA/AE Spectrophotometer 457 de Laboratorio Instrumentación Inc. Las muestras fueron atacadas con mezcla de HCl y HF hasta completa disolución y luego fueron tratadas de acuerdo a métodos convencionales para esta técnica.

El análisis TPD-CO<sub>2</sub> fue llevado a cabo en un reactor de lecho fijo de acero inoxidable (2.54 cm d.e.). Las muestras fueron activadas en corriente de Ar (20 cm<sup>3</sup>/min) a 973K durante 2 h. Luego una corriente de CO<sub>2</sub>/Ar (8:100) se hizo pasar por la muestra durante 5 minutos y fue purgada

con Ar puro para eliminar el CO<sub>2</sub>. Luego de esto, el sólido fue calentado en corriente de Ar con una velocidad de calentamiento de 10 K/min hasta 973K con el propósito de desorber el CO<sub>2</sub>. Esta corriente de gas fue mezclada con una corriente de H<sub>2</sub> (20 cm<sup>3</sup>/min) y pasada a través de un catalizador de Ni/SiO<sub>2</sub> a 673 K para convertir el CO<sub>2</sub> en CH<sub>4</sub> el cual fue cuantificado usando detector FID. De esta manera se determinó la cantidad de CO<sub>2</sub> absorbido.

Dentro de las reacciones más estudiadas, la descomposición de isopropanol parece ser una de las más útiles para investigar las propiedades ácido-base de los sitios catalíticos de óxidos metálicos. Así, los catalizadores pueden clasificarse según sea su tendencia a producir deshidratación ó deshidrogenación de isopropanol a propeno o acetona respectivamente. Así, se utilizó la reacción de descomposición del Isopropanol para la evaluación de los sitios ácidos débiles y/o básicos de los sólidos promovidos soportados sobre SBA-15, para lo cual se puso a punto un equipo experimental.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

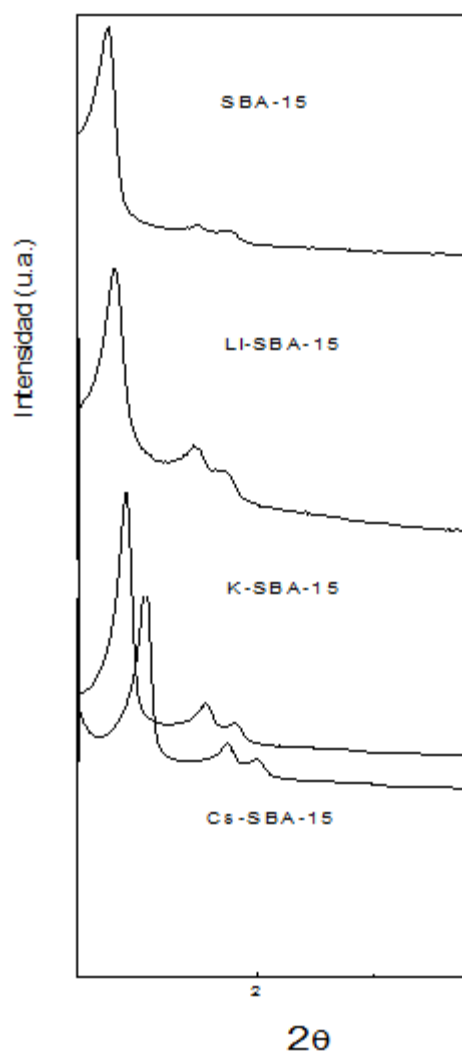
La estructura hexagonal porosa del sólido SBA-15 tiene un diagrama característico de DRX a bajos ángulos. De acuerdo con la literatura, hay tres líneas de difracción a  $2\theta = 0.9, 1.6$  y  $1.8^\circ$  correspondiendo a los planos (100), (110) y (200), asociados con la simetría hexagonal de la SBA-15 [7]. Los diagramas de rayos X a bajos ángulos de la SBA-15 y los soportes impregnados Li-SBA-15, K-SBA-15 y Cs-SBA-15 se muestran en la Figura 1. Las tres líneas descritas antes se pueden diferenciar claramente en el difractograma. La intensidad de la primera línea (plano 100) da idea de la alta simetría de los sólidos obtenidos, y la presencia de dos picos a altos ángulos muestra una alta frecuencia en la estructura. La posición de los picos en el difractograma es prácticamente coincidente, con aquellos publicados en la literatura, los cuales muestran que no hay mayores cambios en la estructura del sólido luego de incorporar los metales alcalinos. Solamente en los sólidos SBA-15 dopados, la posición del pico más intenso muestra un ligero corrimiento hacia ángulos más grandes comparado con el sólido sin dopar. Teniendo en cuenta que la posición del pico en el plano 100 está inversamente relacionado a la distancia interplanar, se concluye que la introducción de los metales alcalinos produce la contracción de la estructura. Otros autores han reportado resultados similares [11].

Los resultados de adsorción-desorción de N<sub>2</sub> de los sólidos sintetizados, denotan isothermas tipo IV, características de sólidos mesoporosos con una distribución estrecha de diámetro de poros. Además todos los sólidos exhiben histéresis tipo H1, que es característica de materiales mesoporosos con forma y tamaño de poro uniformes. El fuerte aumento en la adsorción de N<sub>2</sub> hasta aproximadamente la saturación y la ligera distorsión en los valores del "loop" de histéresis (más notable para el caso de Li-SBA-15) presumirían una ligera tendencia del tipo de histéresis H1 hacia el tipo H3 [12]. Sin embargo, en los tres sólidos dopados no se observaron diferencias significativas con respecto a los sólidos no dopados, así se puede concluir que la adición de metales alcalinos no trae consecuencias sobre la forma de los poros y su distribución estrecha de tamaños. A partir de las isothermas BET, se calcularon los valores del área superficial específica (S<sub>g</sub>), volumen de poro (V<sub>p</sub>), radio de poro (r<sub>p</sub>) y espesor de pared (t) de los canales.

En la Tabla 1, se muestran los valores de la superficie específica entre 400 y 700 m<sup>2</sup>/g, volúmenes de poro entre 0.6 y 1 cm<sup>3</sup> y radios de poro próximos a 40 Å, valores tópicos para este tipo de sólido mesoporoso. Comparando los valores obtenidos para el sólido SBA-15 no dopado respecto del dopado, se puede observar que las

Muestra	S <sub>g</sub> (m <sup>2</sup> /g)	V <sub>p</sub> (cm <sup>3</sup> /g)	r <sub>p</sub> (Å)	t (Å)
SBA-15	893	1.09	41	68
Li-SBA-15	653	0.98	40	23
K-SBA-15	529	0.75	41	21
Cs-SBA-15	435	0.61	35	28

Tabla 1



diferencias no son muy grandes y están en el rango de los valores esperados para estos sólidos. La disminución más importante en valores de S<sub>g</sub> y V<sub>p</sub> se observan para Cs-SBA-15, tal vez debido al mayor tamaño del catión alcalino. Además, en la Tabla 1, se muestra que los valores de radio de poro no han disminuido de la misma manera que el volumen específico y el área superficial



específica. Esto indicaría que cuando se adicionan metales alcalinos, se produce un llenado parcial de los canales. Por otro lado, el espesor de pared estimado para el soporte es sustancialmente menor que el computado para la SBA-15 no dopada. Esto es debido a la contracción de los parámetros de la red acompañado por un cambio despreciable en el radio de poro. Es posible especular que la incorporación del metal alcalino contrae las paredes de los canales. Resultados similares fueron reportados por Zhang y col. [11]. La figura 2 muestra las curvas de desorción a temperatura programada para cada soporte dopado con la deconvolución apropiada usando un ajuste no lineal por cuadrados mínimos con dos picos Gaussianos. Se puede observar que el termograma del sólido SBA-15 no dopado no presenta picos de desorción de CO<sub>2</sub> y su línea de base fue usada para deducir de cada diagrama de los soportes dopados. Esto denota la ausencia de sitios básicos de Lewis en los sólidos no dopados, como fue reportado en la literatura [13].

Los termogramas de los tres soportes dopados presentan dos picos correspondientes a la desorción de CO<sub>2</sub> a relativamente bajas temperaturas en el rango 340-380 y 380-460 K. Estos

Soporte	$-q_0$ in M <sub>2</sub> O	T (K)	W (K)	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	$\mu\text{moles}_{\text{tot}}/\text{g}_{\text{MA}}$	D <sub>M</sub> (%)
Li-SBA-15	0.80	377-458	73-136	1.78	4509	3.0
K-SBA-15	0.89	338-379	41-101	1.78	235	0.9
Cs-SBA-15	0.94	346-448	69-114	0.49	27	0.4

Tabla 2

**(-q<sub>0</sub>):** Carga parcial negativa de oxígeno en los óxidos de metales alcalinos.

**T:** Temperatura máxima del pico de desorción.

**W:** Ancho del pico de desorción a la mitad de su altura.

**A<sub>2</sub>/A<sub>1</sub>:** Relación de áreas del Segundo al primer pico de desorción.

**$\mu\text{moles}_{\text{tot}}/\text{g}_{\text{MA}}$ :** Micromoles totales de CO<sub>2</sub> absorbidos por gramo de metal alcalino.

**D<sub>M</sub>(%):** Dispersión del metal alcalino.

picos corresponden a CO<sub>2</sub> adsorbido en sitios básicos con diferente fuerza de adsorción que serán llamados sitios de fuerza débil e intermedia. Mientras que, como fue mencionada la SBA-15 no dopada no posee ninguno de esos sitios, ellos deben ser atribuidos a la presencia de metales alcalinos del Grupo 1 de la tabla periódica localizados en la superficie del soporte, en coincidencia con reportes previos [14].

En la Tabla 2 se puede observar que el soporte con mayor cantidad de sitios básicos superficiales totales por gramo de metal alcalino es Li-SBA-15, esta cantidad es aproximadamente 20 veces mayor que en K-SBA-15 y 170 veces mayor que en Cs-SBA-15.

Estos resultados no pueden ser explicados a partir del contenido másico de metal alcalino, ya que los contenidos de K y Cs son aproximadamente 4 y 20 veces mayores que el de Li respectivamente. La adsorción de CO<sub>2</sub> sobre metales alcalinos o alcalino térreos tiene lugar bajo diferentes especies: bicarbonato, carbonatos unidentados y carbonatos bidentados [7-10].

Los diferentes tipos de adsorción revelan la diferente naturaleza química de los átomos oxigenados. Así, para la formación de los carbonatos unidentados es necesaria la presencia de O<sup>2-</sup> aislados, los que suelen estar presentes en bordes y vértices de pequeños cristales. Los carbonatos bidentados se forman sobre sitios pares de ácido de Lewis/ base de Brönsted (M<sup>+n</sup>-O<sup>2-</sup>). Finalmente, las especies

bicarbonato se relacionan con las especies hidroxilo superficiales, las que resultan ser las más lábiles de las tres especies. En general, el siguiente orden por fuerza es propuesto para los sitios básicos superficiales: aislados O<sup>2-</sup> > pares M<sup>+n</sup>-O<sup>2-</sup> > grupos OH. Aunque en el presente trabajo estas especies no han sido identificadas, es sabido que una molécula de CO<sub>2</sub> se adsorbe sobre un átomo de metal alcalino. De esta manera, si la cantidad total de moléculas de CO<sub>2</sub> adsorbidas por gramo de sólido está relacionada al número total de metal alcalino por gramo de sólido, un valor equivalente a la dispersión podría obtenerse. Este valor sería independiente de la cantidad de metal alcalino agregado a la muestra. En Tabla 2 se observa que la muestra Li-SBA-15 tiene un valor de dispersión tres veces mayor que el de K-SBA-15 y 7 veces mayor que el de la muestra de Cs-SBA-15. Estas diferencias pueden ser atribuidas al mayor grado de aglomeración de las especies cuando el tamaño de los cationes alcalinos es mayor y/o al incremento de la cantidad de iones alcalinos localizados dentro de las paredes de la SBA-15 (las cuales son inaccesibles a las moléculas de CO<sub>2</sub>). La localización de una fracción

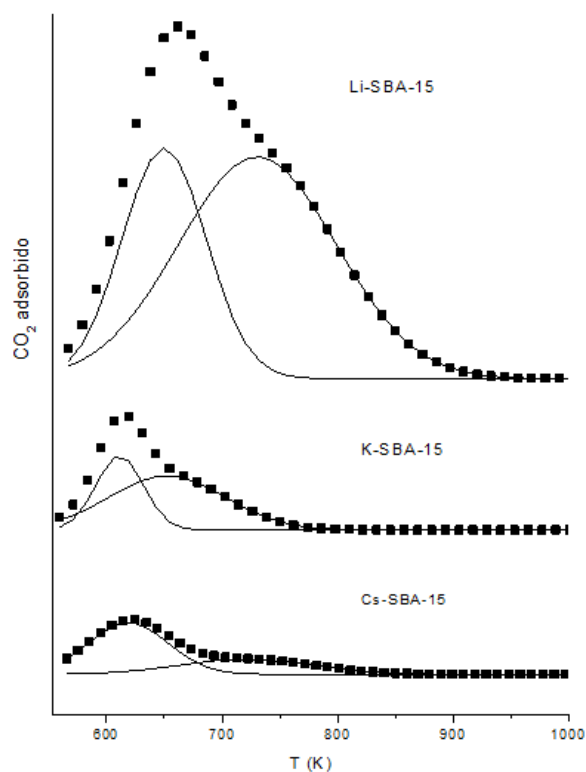


Figura 2

de metal alcalino dentro de las paredes de la SBA-15 es coherente con los parámetros de red y con la mayor densidad de la SBA-15 dopada.

La temperatura máxima y el ancho del pico a mitad de altura se utilizaron para obtener el calor de desorción de CO<sub>2</sub>. Un aumento en esos valores indica un mayor calor de desorción y por lo tanto una mayor fuerza básica de los sitios donde el CO<sub>2</sub> se ha adsorbido [11].

La basicidad de los óxidos superficiales está generalmente relacionada con las propiedades electrodonoras de los aniones oxígeno combinados, así, cuando la carga parcial negativa de estos aniones oxígeno combinados aumenta, el óxido resultante será más básico. En este sentido, la carga parcial negativa del oxígeno ( $-q_0$  en Tabla 2) indicaría las propiedades electrodonoras, en óxidos con un solo componente. Estos valores  $-q_0$  fueron calculados utilizando el principio de ecuación de electronegatividades [12], se puede observar una disminución de  $-q_0$  cuando la masa atómica aumenta. Sin embargo, comparando los tres soportes obtenidos en este trabajo, contrariamente a lo esperado se puede observar que el sólido dopado con Li presenta la mayor fuerza básica para ambos sitios débiles y medios. Muchos autores [23, 30] han encontrado que el Li genera más sitios básicos y de mayor fuerza que lo esperado, cuando es usado como dopante de un sólido.

La muestra K-SBA-15 ha adsorbido 8 veces mayor cantidad de CO<sub>2</sub> por gramo de carga metálica que Cs-SBA-15; sin embargo, tiene un contenido de metal 5.4 veces menor. Además, ambos tipos de sitios generados por el K son más débiles que los producidos por Cs, ya que sus picos de desorción son agudos y aparecen a menores temperaturas que aquellos correspondientes a Cs-SBA-15. Estos resultados han sido reportados por otros autores [31].

Otro resultado es que las muestras Li-SBA-15 y K-SBA-15 tienen una población de sitios de fuerza media que es dos veces la población de sitios débiles ( $A_2/A_1$  en Tabla 2), mientras que en Cs-SBA-15 esta situación se invierte.

En el presente trabajo se puede observar que si bien generamos sitios básicos superficiales en la SBA-15 a partir del agregado de metales alcalinos, las propiedades estructurales del soporte se mantienen.

El orden establecido a partir del test de isopropanol corroboraron los resultados obtenidos hasta ahora resultando, por el número total de sitios:  $Li \gg K \cong Cs$  y el orden por fuerza básica de ambos tipos de sitios:  $Li > Cs > K$ .

## CONCLUSIONES

Se sintetizó SBA-15 dopada con diferentes metales alcalinos preservando las características estructurales del sólido mesoporoso.

La introducción del metal alcalino dentro de los canales del sólido no produce cambios significativos en las propiedades estructurales y texturales de la SBA-15, solamente se evidencia una densificación en las paredes de los canales.

La incorporación de metales alcalinos en el soporte genera sitios básicos de fuerza débil y media que no están presentes en la SBA 15 no dopada.

De acuerdo al metal alcalino usado, el orden establecido por el número total de sitios es:  $\text{Li} \gg \text{K} \cong \text{Cs}$ , mientras que el orden por fuerza para ambos tipos de sitios (débil e intermedia) es:  $\text{Li} > \text{Cs} > \text{K}$ .

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Steynberg, M. Dry (Eds.), Fischer-Tropsch Technology, Stud. Surf. Sci. Catal., Elsevier, Amsterdam, 2004.
- [2] M. Luo, H. Hamdeh, B.H. Davis, Fischer-Trpsch Synthesis: Catalyst activation of low alpha iron catalyst, Catal. Today 140 (2009) 127-134.
- [3] M.A. Vannice, The catalytic synthesis of hydrocarbons from H<sub>2</sub>CO mixtures over the group VIII metals: I. The specific activities and product distributions of supported metals, J. Catal. 37 (1975) 449-461.
- [4] C.H. Bartholomew, Recent Developments in Fischer-Tropsch Catalysis, in: L. Guzzi (Ed.), New trends in CO activation, Studies in Surface Science and Catalysts, Elsevier, Amsterdam, 1991, pp. 158-224.
- [5] M.A. Mc Donald, D.A. Storm, M. Boudart, Hydrocarbon Synthesis from carbon monoxide-hydrogen on supported iron: Effect of particle size and interstitials, J. Catal. 102 (1986) 386-400.
- [6] M. Luo, R.J. O'Brien, S. Bao, B.H. Davis, Fischer-Tropsch synthesis: Induction and steady-state activity of high-alpha potassium promoted iron catalysts, Appl. Catal. 239 (2003) 111-120.
- [7] D. Zhao, Q. Huo, J. Feng, B.F. Chmelka, G.D. Stucky, Nonionic Triblock and Star Diblock Copolymer and Oligomeric Surfactant Syntheses of Highly Ordered, Hydrothermally Stable, Mesoporous Silica Structures, J. Am. Chem. Soc. 120 (1998) 6024-6036.
- [8] C. Wang, L. Xu, Q. Wang, Review of Directly Producing Light Olefins via CO Hydrogenation, Journal of Natural Gas Chemistry 12(2003)10-16.
- [9] G. van der Lee, V. Ponc, On some problems of selectivity in syngas reactions on the group of VIII metals, Catal Rev, Sci Eng, 29 (1987) 183-218.
- [10] W. Ngantsoue-Hoc, Y. Zhang, R.J. O'Brien, M. Luo, B.H. Davis, Fischer-Tropsch synthesis: activity and selectivity for Group I alkali promoted iron-based catalysts, Applied Catalysis 236(2002) 77-89.
- [11] T. Zhang, R. Wang, W. Geng, X. Li, Q. Qi, Y. He, S. Wang, Study on humidity sensing properties based on composite materials of Li-doped mesoporous silica A-SBA-15, Sens. Actuators B Chem. 128 (2008) 482-487.
- [12] K.S.W. Sing, D.H. Everett, R.A.W. Haul, L. Moscou, R.A. Pierotti, J. Rouquerol, T. Siemieniewska, Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity, Pure & Appl. Chem. 57 (1985) 603-619.
- [13] S. Yang, W. Zhu, Q. Zhang, Y. Wang, Iron-catalyzed propylene epoxidation by nitrous oxide: Effect of boron on structure and catalytic behavior of alkali metal ion-modified FeOx/SBA-15, Journal of Catalysis 254 (2008) 251-262.
- [14] J.H. Zhu, Y. Chun, Y. Wang, Q.H. Xu, New unusually strong solid basic material derived from KL zeolite impregnated with KNO<sub>3</sub>, Materials Letters 33 (1997) 207-210.

## PREDICCIÓN DE LAS VELOCIDADES EFECTIVAS PARA SISTEMAS DE MÚLTIPLES REACCIONES CATALÍTICAS UTILIZANDO MODELOS UNIDIMENSIONALES

María Taulamet\*, Sergio Keegan, Néstor Mariani, Osvaldo Martínez, Guillermo Barreto

PROIRQ, Departamento de Ingeniería Química,  
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata,  
La Plata, Argentina  
Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas "Dr. J. J. Ronco"  
(CINDECA) CONICET- UNLP - CCT La Plata  
Calle 47 No. 257, CP B1900AJK, La Plata, Argentina  
\*e-mail: [mtaulamet@gmail.com](mailto:mtaulamet@gmail.com)

### INTRODUCCIÓN

Normalmente en el modelado de lechos rellenos catalíticos, los balances de masa en el interior de las pastillas catalíticas deben ser planteados en dos (2D) o tres (3D) dimensiones espaciales. Esta circunstancia hace que, prácticamente, la única vía de resolución de los mismos sea numérica, tarea que resulta computacionalmente asequible cuando se tiene un único conjunto de condiciones. Si se pretende abordar la optimización de un reactor o cuando se trata de sistemas que involucran un conjunto de reacciones, es evidente que la demanda de tiempo de cómputo crece de manera significativa, debido a que los cálculos deben realizarse miles de veces. Por lo tanto, resulta altamente conveniente evitar cálculos que involucren 2 ó 3 dimensiones espaciales.

Aris[1] presentó un enfoque simple para reducir los problemas 2D ó 3D en un problema unidimensional (1D). El mismo se basa en reconocer que a altos valores del módulo de Thiele ( $\phi$ ), el factor de efectividad para una reacción única no depende de la forma de la pastilla catalítica, sino sólo del cociente entre el volumen y la superficie externa de la misma ( $\ell=V_p/S_p$ ). Para llevar a cabo evaluaciones aproximadas a valores de  $\phi$  bajos e intermedios, puede adoptarse cualquier geometría que presente el mismo valor de  $\ell$  que la pastilla analizada. La precisión esperable empleando esta aproximación es del orden del 20% para una única reacción y una expresión cinética relativamente simple.

Datta y Leung[2] propusieron un modelo 1D más conveniente, denominado del cilindro generalizado (1D-CG), en el cual se plantea que la difusión procede a lo largo de una única dirección  $z$ , en una distancia  $L$  de un cuerpo hipotético cuya sección transversal es variable de acuerdo a  $z^\sigma$ , siendo  $z$  la coordenada adimensional. La obtención de los valores de los dos parámetros del modelo,  $L$  (longitud de difusión) y, especialmente,  $\sigma$  (factor de forma), fue extensamente discutida y sistematizada por Mariani y col. [3-6], demostrando la potencialidad del modelo 1D-CG para reacciones únicas con expresiones cinéticas sencillas.

Sin embargo, se detectó que el modelo 1D-CG puede conducir a errores significativamente mayores para pastillas comerciales cuyas relaciones entre las dimensiones geométricas se varían respecto a los valores de catálogo [7]. Para restaurar dicho nivel de precisión se propuso un nuevo modelo unidimensional, denominado de difusividad variable (1D-DV), que introduce tres parámetros, para cuya evaluación se establece que el mismo reproduzca el comportamiento catalítico de la pastilla real a altas y bajas velocidades de reacción en forma simultánea. El modelo 1D-DV garantiza una precisión superior al 2% para un amplio conjunto de pastillas catalíticas con una expresión cinética lineal isotérmica. Mariani y col. [8] analizaron el efecto de la expresión cinética sobre la capacidad predictiva de los modelos 1D, extendiendo el análisis hasta el límite de los estados estacionarios múltiples para un conjunto representativo de pastillas catalíticas comerciales, encontrando que el modelo 1D-CG alcanza errores que superan el 40%. Sin



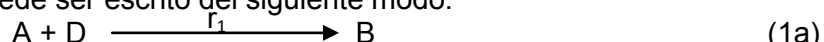
embargo, el empleo del modelo 1D-DV permite reducir considerablemente el nivel de error, alcanzando valores máximos del orden del 10%, aún en los casos más críticos.

Estos antecedentes constituyen una sólida base para representar el comportamiento de reacciones únicas empleando modelos 1D, pero es muy frecuente en los procesos industriales encontrar sistemas de reacciones múltiples[9], donde no solo la evaluación de la efectividad de la pastilla, sino también la selectividad hacia el producto deseado deben ser cuantificadas. En este sentido, no hay, en nuestro conocimiento, estudios que aborden de una manera sistemática el desarrollo de herramientas que permitan reducir la evaluación de las velocidades de reacción de una pastilla 2D ó 3D mediante un modelo 1D, cuando existen reacciones múltiples.

Teniendo en cuenta los resultados alcanzados para una reacción única, el objetivo de este trabajo es analizar la capacidad de los modelos 1D-CG y 1D-DV para aproximar el comportamiento cinético de reacciones múltiples (empleando dos esquemas cinéticos: reacciones en serie de primer orden isotérmicas y un conjunto de reacciones que corresponden al proceso de hidrogenación selectiva de corrientes de  $C_4$ ), para un conjunto representativo de pastillas catalíticas comerciales.

### 1. Empleo de Modelos Unidimensionales para Predecir las Velocidades Efectivas en el Caso de Reacciones Múltiples

Se emplearon los modelos 1D-CG y 1D-DV aplicados a dos casos de reacciones múltiples: un sistema de reacciones en serie de primer orden isotérmicas (caso I) y un conjunto de reacciones que corresponden al proceso de hidrogenación selectiva (caso II). Ambos sistemas presentan un esquema de reacciones irreversibles análogo (con diferentes expresiones cinéticas) que puede ser escrito del siguiente modo:



donde  $r_1$  y  $r_2$  son las velocidades de reacción para las reacciones 1 y 2. Las velocidades netas de consumo de A, B y C resultan:  $\pi_A = r_1$ ,  $\pi_B = r_2 - r_1$ ,  $\pi_C = -r_2$  y  $\pi_D = r_1 + r_2$

El balance de conservación en estado estacionario para el problema de reacción-difusión en una pastilla 3D, considerando actividad catalítica y difusividad uniforme  $D_i$  es:

$$D_i \Delta(C_i) = \ell^2 \pi_i \text{ en } V_p; C_i = C_{i,S} \text{ en } S_p \quad (i=A, B) \quad (2)$$

$V_p$  es el volumen del catalizador y  $S_p$  la superficie externa de la pastilla; el operador Laplaciano  $\Delta$  ha sido adimensionalizado con la longitud característica  $\ell$ ,  $C_i$  es la concentración de  $i$  y  $C_{i,S}$  es la concentración de  $i$  sobre  $S_p$ .

Se definen las velocidades de reacción ( $r_j$ ) y consumo observadas, respectivamente, como:

$$(r_j)^{obs} = V_p^{-1} \int_{V_p} r_j \, dV \quad ; \quad (\pi_j)^{obs} = V_p^{-1} \int_{V_p} \pi_j \, dV \quad (3a, b)$$

El modelo 1D-CG consiste en un sólido que permite el transporte de calor y materia en una única coordenada espacial  $z'$ ,  $0 < z' < L$ , y presenta una sección transversal variable según  $S(z) = S_p(z'/L)^\sigma = S_p z'^\sigma$ . El modelo posee dos parámetros geométricos: la longitud de difusión  $L$  y el exponente de forma  $\sigma$ . La longitud equivalente resulta  $\ell = L/(\sigma+1)$ . En este modelo, el balance de conservación puede escribirse como:

$$D_i z'^{-\sigma} d(z'^\sigma dC_i/dz')/dz = (1+\sigma)^2 \ell^2 \pi_i \quad ; \quad C_i = C_{i,S} \text{ en } z=0 \quad ; \quad dC_i/dz=0 \text{ en } z=1 \quad (4)$$

Si  $\sigma=0, 1, 2$  este modelo se reduce a una placa plana, un cilindro circular infinito o una esfera.

La definición del valor  $\sigma$  ha sido extensamente discutida en publicaciones previas [3-7, 10, 11]. Definida la velocidad de reacción sobre la superficie externa,  $r_s$ , el procedimiento empleado para obtener  $\sigma$  en el caso de una única reacción se basa en expandir  $(r^{obs}/r_s)$ , en función de una serie de potencias de  $r_s$  (para bajos valores de  $r_s$ ), o expandir  $(r^{obs}/r_s^{1/2})$  en función de una serie de potencias de  $(1/r_s^{1/2})$  (para elevados valores de  $r_s$ ). En ambos casos, los segundos términos de las series que se generan contienen factores dependientes de la forma de la pastilla,  $\gamma$  y  $\Gamma$  para bajas y altas velocidades de reacción, respectivamente. Los

mismos pueden evaluarse con baja dificultad para cualquier forma de las disponibles en catalizadores comerciales. El parámetro  $\gamma$  resulta estrictamente independiente del tipo de expresión cinética [3], mientras que  $\Gamma$  presenta una débil funcionalidad con la misma [10,11]. El significado de  $\gamma$  se mantiene inalterado para cualquier sistema de reacciones múltiples, mientras que estrictamente debe esperarse que cada reacción tenga asociado un valor propio de  $\Gamma$ . Sin embargo, Taulamet[12] demostró para sistemas isotérmicos que cuando todas las expresiones de la velocidad de reacción son de primer orden, el valor de  $\Gamma$  es único y estrictamente igual al de una única reacción, también de primer orden. Además, en virtud de su débil dependencia con la forma de la expresión cinética para el caso de una única reacción, en este trabajo (y se sugiere en general) se adoptará un único  $\Gamma$  para todas las reacciones, cuyo valor será estimado mediante la expresión empleada en trabajos previos para una única reacción considerando una cinética de primer orden isotérmica e irreversible [4-8, 10, 11].

De acuerdo a lo comentado en el párrafo anterior surgen dos alternativas para emplear el modelo 1D-CG: el ajuste de  $\sigma$  con el parámetro  $\gamma$  de la pastilla real (identificada como modelo 1D-CG $\gamma$ ):

$$\sigma = (3\gamma - 1)/(1 - \gamma) \quad (5)$$

o bien con el valor de  $\Gamma$  (modelo 1D-CG $\Gamma$ ):

$$\sigma = \Gamma/(1 - \Gamma) \quad (6)$$

Por su parte, en el modelo 1D-DV se propone analizar las reacciones como si tuviesen lugar en una placa plana de semi-espesor  $\ell$ , con difusividad espacialmente variable para las especies:

$$\Delta_i(z) = D_i \exp[C_1(1-z) + C_2(1-z)^\alpha] \quad (7)$$

donde  $z$  es la coordenada adimensional  $z'/\ell$  medida desde el plano central de la placa,  $D_i$  la difusividad efectiva y  $C_1$ ,  $C_2$  y  $\alpha$  son parámetros definidos tal que el modelo ajuste los tres parámetros de forma de la pastilla real:  $\gamma$ ,  $\beta$  y  $\Gamma$ , siendo  $\gamma$  y  $\Gamma$  los parámetros antes descritos y  $\beta$  el parámetro (también estrictamente de forma) correspondiente al tercer término de la serie expansión de  $(r_i^{obs}/r_s)$  a bajos valores de  $r_s$ [3]. Las relaciones que surgen entre los parámetros del modelo ( $C_1$ ,  $C_2$  y  $\alpha$ ) y los de la pastilla real ( $\gamma$ ,  $\beta$  y  $\Gamma$ ) pueden consultarse en [8].

Los balances de materia para el modelo 1D-DV resultan:

$$d[D_i(z)dC_i/dz]/dz = \ell^2 \pi_i \quad ; \quad C_i = C_{i,s} \text{ en } z=1 \quad ; \quad dC_i/dz=0 \text{ en } z=0 \quad (8)$$

## 2. Resultados y discusión

Se seleccionaron las tres pastillas de catalizador de catálogo (trilobular, 4-agujeros, *wagonwheel*) mostradas en la Tabla 1. En particular, se incluyeron las pastillas con múltiples agujeros internos ya que al momento de aplicar los modelos 1D a una única reacción estas fueron las que presentaron los mayores errores.

Tanto para resolver el balance de materia en la pastilla real 3D (Ecs. 2), como para hacer lo propio con las que corresponden a los modelos 1D (Ecs. 4 para el 1D-CG y Ecs. 8 para el 1D-DV) se utilizó la plataforma *Comsol Multiphysics*®. En todos los casos se ajustó el tamaño de la malla en la evaluación numérica para garantizar una precisión superior al 0.1%.

El error relativo en el que se incurra para la reacción 1 por la aplicación de los modelos 1D se evaluará de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\varepsilon_1 = 100 \left[ (r_1)_m^{obs} - (r_1)^{obs} \right] / (r_1)^{obs} \quad (9a)$$

donde el subíndice  $m$  identifica el modelo que se está utilizando (1D-CG $\gamma$ , 1D-CG $\Gamma$  o 1D-DV); mientras que el error relativo para la reacción 2 se define como:

$$\varepsilon_2 = 100 \left[ (r_k)_m^{obs} - (r_k)^{obs} \right] / (r_k)^{obs} \text{ donde } r_k = \max \{ |r_2|, |\pi_B| \} \quad (9b)$$

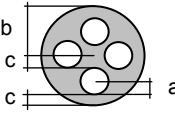
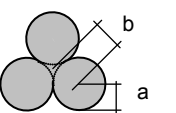
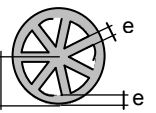
Dado que tanto  $r_2$  como  $\pi_B$  pueden eventualmente anularse, seleccionar el máximo valor entre  $|r_2|$  y  $|\pi_B|$  permite estimar el error en la predicción de la velocidad de la segunda reacción, evitando dividir por un número muy pequeño, lo cual generaría errores relativos muy altos que no presentan ninguna significación, ya que en estas condiciones desde el punto de vista práctico la reacción 2 no procedería siendo, por ende, la estimación de su velocidad superflua. En las Tablas 3 y 4, que se mostrarán en las secciones siguientes,  $\varepsilon_2^{\max}$  se indica en color negro cuando el mismo corresponde a los casos en los que  $|\pi_B| > |r_2|$ , mientras que se indica en color azul cuando corresponde a los casos en los que  $|r_2| > |\pi_B|$ .

Para valorar la precisión de los modelos 1D, para cada esquema cinético y forma de pastilla, se compararán los errores máximos para cada una de las velocidades de reacción observadas.

$$\varepsilon_1^{\max} = \max_{\{\phi_1, \phi_2\}} |\varepsilon_1| \quad ; \quad \varepsilon_2^{\max} = \max_{\{\phi_1, \phi_2\}} |\varepsilon_2| \quad (10a, b)$$

donde  $\{\phi_1, \phi_2\}$  indica el rango completo de módulos de Thiele de las reacciones que ocurren (ver definición de  $\phi_1$  y  $\phi_2$  en las Ecs. 12).

**Tabla 1.** Secciones transversales y parámetros geométricos de las pastillas analizadas ( $y=a/b$ ;  $h=H/(H+b)$ ). H corresponde a la altura de la pastilla).

Pastilla	4-agujeros	Trilobular	Wagon wheel
Sección transversal			
Dimensiones	$y=0.273$ $c=0.833 a$ $h=0.645$	$y=0.866$ $h=0.684$	$e=0.2 b$ $h=0.477$

### Caso I: Reacciones en serie de primer orden

Respecto al esquema (1), para el caso de reacciones irreversibles en serie de primer orden isotérmicas corresponde excluir el reactivo D o bien a suponer que el mismo se encuentra en gran exceso. A su vez, las expresiones cinéticas consideradas son

$$r_1 = k_1 C_A \quad ; \quad r_2 = k_2 C_B \quad (11a, b)$$

Los módulos de Thiele referidos a las reacciones 1 y 2 se definen en este caso como:

$$\phi_1^2 = \ell^2 r_{1,S} / D_A C_{A,S} \quad ; \quad \phi_2^2 = \ell^2 r_{2,S} / D_B C_{B,S} \quad (12a, b)$$

el sufijo "S" indica la magnitud evaluada sobre la superficie externa. Adicionalmente, se asume que las difusividades efectivas de ambas sustancias, A y B, son idénticas ( $D_A = D_B = D$ ). En una primera etapa, se tomaron los siguientes valores para las concentraciones de A y B en la superficie:  $C_{A,S} = 1 \text{ mol/l}$  y  $C_{B,S} = 0$ , posteriormente, se modificó el valor de  $C_{B,S}$ .

Se analizaron dos situaciones: por un lado se utilizaron las relaciones geométricas finitas mostradas en la Tabla 1 y, por el otro, se analizó el caso de  $h=1$  (correspondiente a  $H \rightarrow \infty$ , i.e., sólo se considera la sección transversal de la pastilla), condición para la cual, en general, se producen los mayores errores cuando se emplean los modelos 1D propuestos para predecir las velocidades observadas en el caso de una única reacción. Asimismo, para esta condición ( $h=1$ ) se espera que se manifiesten más nítidamente los efectos de la forma de los distintos tipos de pastillas analizadas sobre las velocidades de reacción efectivas.

En la Tabla 2 se presentan los valores de  $\Gamma$ ,  $\gamma$  y  $\beta$  para las pastillas de la Tabla 1, así como también los parámetros derivados para los modelos 1D. Cabe aclarar que teniendo en cuenta los comentarios realizados en la sección 2,  $\Gamma$  fue evaluado considerando una cinética isotérmica de primer orden.

Para cada forma de pastilla se analizaron tres casos ( $\phi_2/\phi_1 = 0.1, 1, 10$ ) buscando tener en cuenta las posibilidades de que la segunda reacción sea más lenta, igual o más rápida que

la primera, respectivamente. A su vez, para cada forma de pastilla,  $\phi_1$  se varió de manera de analizar el rango completo  $0 \leq \phi_1 \leq \infty$ .

**Tabla 2:** Parámetros de forma para las partículas 3D de la Tabla 1 y valores de los parámetros de los modelos 1D.

Parámetro	Pastilla						
	4 agujeros		Trilobular		Wagonwheel		
	h=1	h=0.645	h=1	h=0.684	h=1	h=0.477	
Pastilla real	$\Gamma$	-0.241	0.164	0.377	0.732	-0.173	0.297
	$\gamma$	0.366	0.448	0.443	0.625	0.347	0.448
	$\beta$	0.185	0.290	0.255	0.566	0.180	0.307
1D-CG $\gamma$	$\sigma_\gamma$	0.157	0.622	0.595	2.333	0.063	0.624
1D-CG $\Gamma$	$\sigma_\Gamma$	-0.194	0.195	0.606	2.726	-0.148	0.423
1D-DV	$\alpha$	5.229	5.795	4.156	3.356	12.375	11.302
	$C_1$	0.482	-0.327	-0.754	-1.463	0.346	-0.594
	$C_2$	-6.381	-5.970	-1.976	-2.483	-9.938	-8.497

En la Tabla 3 se muestran los valores de  $\varepsilon_1^{\max}$  y  $\varepsilon_2^{\max}$  obtenidos empleando los modelos 1D para las formas de la Tabla 1 con altura infinita,  $h=1$ .

**Tabla 3:** Error máximo ( $\varepsilon_1^{\max}$ ,  $\varepsilon_2^{\max}$ ) en la predicción de las velocidades observadas usando aproximaciones 1D para partículas comerciales (altura infinita,  $h=1$ ) y expresiones cinéticas irreversibles en serie de primer orden con  $C_{A,S} = 1$  mol/l,  $C_{B,S} = 0$

Modelo	Pastilla ( $\varepsilon_1^{\max}$ , $\varepsilon_2^{\max}$ )		
	4-agujeros	Trilobular	Wagonwheel
1D-DV	0.1, 0.1	0.1, 0.3	0.2, 0.2
1D-CG $\gamma$	4.4, 6.6	0.3, 0.3	2.7, 5.0
1D-CG $\Gamma$	4.9, 6.4	0.4, 0.5	2.0, 2.5

Observando la Tabla 3, se advierte que el error máximo en la estimación de las velocidades observadas resulta definitivamente inferior al 1% si se usa el modelo 1D-DV y del orden del 7 % si se utiliza modelo 1D-CG (independientemente del criterio propuesto para fijar el parámetro  $\sigma$ ). Estos resultados demuestran que ambos modelos permiten alcanzar una precisión completamente aceptable en la estimación de las velocidades observadas para el rango completo de módulos de Thiele de ambas reacciones.

Adicionalmente se utilizaron las relaciones geométricas finitas mostradas en la Tabla 1 ( $h < 1$ ), y se analizó también el caso de  $C_{B,S} \neq 0$  ( $C_{B,S}$  [mol/l] = 0.5 / 1), manteniendo  $C_{A,S} = 1$  mol/l, para la pastilla de 4-agujeros con  $h=1$ , obteniéndose en todos los casos errores del mismo orden de magnitud que los mostrados en la Tabla 3.

Para todos los casos analizados los errores máximos en la predicción de la velocidad observada de la primera reacción ( $\varepsilon_1^{\max}$ ) se producen para valores intermedios de  $\phi_1$  (entre 0.5 y 3.5), independientemente del valor que tome  $\phi_2$ . Mientras que los errores máximos en la predicción de la velocidad observada de la segunda reacción (expresados como  $\varepsilon_2^{\max}$ ) se producen cuando  $\phi_1 = \phi_2$  y para valores intermedios de ambos módulos de Thiele ( $0.5 \leq \phi_1 = \phi_2 \leq 2.5$ ).

#### Caso II: Hidrogenación Selectiva de Cortes de $C_4$

Los procesos de hidrogenación selectiva de olefinas se llevan a cabo para eliminar impurezas como dienos o acetilénicos. En el corte  $C_4$  se trata de eliminar el 1,3 butadieno (BD) y el 1-butino (BY) para obtener 1-buteno (1BE) de alta pureza. La eliminación del BD es crítica en el proceso de purificación, ya que el BY se hidrogena en primer lugar. Un

aspecto clave del proceso es evitar la hidrogenación del 1BE a butano (BA) para tener alta selectividad. Un estudio cinético completo de este sistema sobre un catalizador comercial fue realizado por Alves [13].

Para el sistema de reacciones (1a y b) planteado en la sección 2, con  $A \equiv BD$ ,  $B \equiv 1BE$ ,  $C \equiv BA$  y  $D \equiv H_2$ , las expresiones cinéticas [14] son:

$$r_1 = (K_{BD}/K_{1BE})k_1C_{BD}C_{H_2}/DEN_{HC} \quad ; \quad r_2 = k_2C_{1BE}C_{H_2}/DEN_{HC}$$

$$\text{con } DEN_{HC} = (1/K_{1BE})C_T + (K_{BD}/K_{1BE})C_{BD} + C_{1BE}$$

$K_{BD}$  y  $K_{1BE}$  son las constantes de equilibrio de adsorción-desorción del BD y 1BE,  $C_{BD}$ ,  $C_{1BE}$  y  $C_{H_2}$  son las concentraciones de BD, 1BE e  $H_2$  en fase líquida,  $C_T$  es la concentración total de la corriente.

Cabe aclarar que para definir los módulos de Thiele referidos a las reacciones 1 y 2 en este caso también se emplean las Ecs. (12).

El análisis de este sistema se limitó a dos formas de pastillas: 4-agujeros y trilobular con  $h=1$ . Se estableció una condición base para el análisis:  $C_{BD,S}=0.01$  y  $C_{1BE,S}=0.2 \text{ mol l}^{-1}$ , para  $C_{H_2,S}$  se fijó un valor lo suficientemente grande como para considerar que este reactivo se encuentra en exceso,  $k_1=k_2$ ,  $K_{BD}/K_{1BE}=1000$ ,  $C_T/K_{1BE}=10^{-4}$ ,  $D_{BD}=D_{1BE}=D$ ,  $D_{H_2}/D=4$ . Detalles adicionales pueden consultarse en [15].

Los valores de  $\Gamma$ ,  $\gamma$  y  $\beta$  para las pastillas reales, así como los parámetros derivados para los modelos 1D son los reportados en la Tabla 2. Para  $k_1=k_2$  resulta  $\phi_2 = \phi_1 \sqrt{K_{1BE}/K_{BD}}$ , en estas condiciones,  $\phi_1$  se varió en el rango 0.01-32.

En la Tabla 4 se reportan los valores de  $\varepsilon_1^{\max}$  y  $\varepsilon_2^{\max}$  obtenidos a partir del empleo de los modelos 1D en la condición base para las pastillas de 4-agujeros y trilobular, ambas con  $h=1$  (i.e., altura infinita). Se puede advertir que el error máximo en la estimación de las velocidades observadas resulta, en general, inferior al 4% si se utiliza el modelo 1D-DV, mientras que el empleo del modelo 1D-CG puede conducir a valores de  $\varepsilon^{\max}$  de hasta alrededor de 32%.

**Tabla 4:** Error máximo ( $\varepsilon_1^{\max}$ ,  $\varepsilon_2^{\max}$ ) en la predicción de las velocidades observadas usando aproximaciones 1D para el sistema de hidrogenación selectiva en la condición base para las pastillas de 4-agujeros y trilobular, ambas con  $h=1$ .

Modelo	Pastilla ( $\varepsilon_1^{\max}$ , $\varepsilon_2^{\max}$ )	
	4-agujeros	Trilobular
1D-DV	1.4, 3.7	0.8, 1.3
1D-CG $\gamma$	6.3, 22.7	0.1, 0.2
1D-CG $\Gamma$	12.1, 31.6	0.3, 0.6

Dado que los resultados indican que los mayores valores de  $\varepsilon^{\max}$  (definidos en las Eqs. 10) en los que se incurre al estimar las velocidades efectivas de reacción se presentan para el caso de la pastilla de 4-agujeros de longitud infinita (ver Tabla4), se analizó el efecto de las variables y parámetros principales del sistema sobre las predicciones sólo para este tipo de pastilla. Se modificó individualmente la relación entre  $C_{BD,S}$  y  $C_{1BE,S}$ , la  $C_{H_2}$ , la relación entre  $k_1$  y  $k_2$  y la relación entre  $K_{BD}$  y  $K_{1BE}$ . Cabe aclarar que para cada caso los parámetros y variables restantes se mantienen en los valores de la condición base. El  $\varepsilon^{\max}$  para el modelo 1D-CG asciende a valores del orden del 60%, mientras que para el modelo 1D-DV resultan de hasta aproximadamente un 6%.

### 3. Conclusiones



En este trabajo se presentan los resultados alcanzados a partir de la utilización de dos modelos unidimensionales para aproximar el comportamiento de pastillas de catalizador comerciales en las cuales tienen lugar múltiples reacciones: el del Cilindro Generalizado (1D-CG) de un único parámetro y el de Difusividad Variable (1D-DV) de tres parámetros.

Se pudo constatar que el modelo 1D-CG arroja errores máximos (*i.e.*, variando los módulos de Thiele) en la estimación de la velocidad efectiva de las reacciones de hasta el 7% para el sistema más simple (reacciones isotérmicas en serie de primer orden) y de hasta el 60% para el sistema más complejo (hidrogenación selectiva), independientemente del criterio utilizado para fijar su único parámetro libre.

Por el contrario, el modelo 1D-DV presenta una precisión completamente satisfactoria para ambos casos de reacciones múltiples y todas las condiciones analizadas. Se detectó un nivel máximo de error en las estimaciones del orden de 1% para el sistema de reacciones irreversibles isotérmicas en serie de primer orden y de hasta aproximadamente un 6% para el sistema de hidrogenación selectiva. Los errores máximos que surgen de la aplicación de ambos modelos se producen siempre a valores intermedios de los módulos de Thiele.

#### 4. Agradecimientos

Los autores agradecen el aporte financiero de las siguientes instituciones CONICET (PIP # 0018) y UNLP (PID # 11/1177).

#### 5. Referencias

- [1] R. Aris; *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 4 (1965) 227-229.
- [2] R. Datta, S. W. K. Leung; *Chem. Eng. Comm.* 39 (1) (1985) 155-173.
- [3] N. J. Mariani, S. D. Keegan, O. M. Martínez, G. F. Barreto; *Chem. Eng. Res. Des.* 81A (2003) 1033-1042.
- [4] N. J. Mariani, S. D. Keegan, O. M. Martínez, G. F. Barreto; *Cat. Today* 133-135 (2008) 770-774.
- [5] N. J. Mariani, C. Mocciaro, S. D. Keegan, O. M. Martínez, G. F. Barreto; *Chem. Eng. Sci.* 64 (2009) 2762-2766.
- [6] N. J. Mariani, C. Mocciaro, S. D. Keegan, O. M. Martínez, G. F. Barreto; *Ind. Eng. Chem. Res.* 48 (3) (2009) 1172-1177.
- [7] C. Mocciaro, N. J. Mariani, O. M. Martínez, G. F. Barreto; *Ind. Eng. Chem. Res.* 50 (2011) 2746-2754.
- [8] N. J. Mariani, M.J. Taulamet, S. D. Keegan, O. M. Martínez, G. F. Barreto; *Ind. Eng. Chem. Res.* 52 (2013) 15321-15329.
- [9] Z.I. Önsan, A.K. Avci, (eds.) *Multiphase Catalytic Reactors. Theory, Design, Manufacturing and Applications* in John Wiley & Sons, Inc, Hoboken-New Jersey (2016).
- [10] S. D. Keegan, N. J. Mariani, O. M. Martínez, G. F. Barreto; *Chem. Eng. J.* 110 (2005) 41-56.
- [11] S. D. Keegan, N. J. Mariani, O. M. Martínez, G. F. Barreto; *Ind. Eng. Chem. Res.* 45 (2006) 85-97.
- [12] M.J. Taulamet, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, 2015.
- [13] J.A. Alves, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, 2009.
- [14] J.A. Alves, S.P. Bressa, O.M. Martínez, G.F. Barreto; *Ind. Eng. Chem. Res.*, 52 (2013) 5849-5861.
- [15] M. J. Taulamet, N. J. Mariani, O. M. Martínez, G. F. Barreto; Manuscrito en preparación (2016).

## OXIDACIÓN PREFERENCIAL DE CO UTILIZANDO CATALIZADORES DE Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MODIFICADOS CON Co.

Núñez, Natalia E. <sup>(1,2)</sup>, Bideberripe, Hernán P. <sup>(1,2)</sup>, Casella, Mónica L. <sup>(2)</sup>, Siri, Guillermo J. <sup>(1,2)</sup>

<sup>(1)</sup> PIDCAT, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata UNLP, 1 esq. 47, 1900 La Plata, Argentina.

<sup>(2)</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas “Dr. Jorge Ronco” (CINDECA), Facultad de Ciencias Exactas, UNLP - CCT La Plata - CONICET, 47 N°257, 1900 La Plata, Argentina.

hernan.bideberripe@ing.unlp.edu.ar

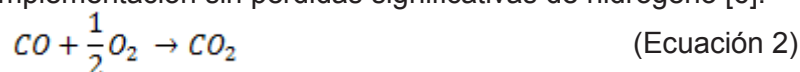
### INTRODUCCIÓN

Las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC), despiertan un amplio interés debido a su eficiencia para la generación de energía eléctrica. Estas celdas se basan en una reacción electroquímica por lo que su eficiencia no está limitada por el ciclo de Carnot y presentan ventajas como alta eficiencia, baja temperatura de operación, rápido encendido y principalmente no emiten contaminantes al ambiente [1]. Los principales procesos disponibles para la obtención de hidrógeno son a través de la producción de gas de síntesis [2]. Este gas consiste en una mezcla de H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y CO. El CO se adsorbe fuertemente sobre el electrodo de platino que constituye el ánodo de la PEMFC, siendo la máxima cantidad tolerable de CO de 10 a 100 ppm [3]. El gas de síntesis posee entre 3% a 10% de CO [4], por lo que debe eliminarse CO. Para esto, la mezcla debe someterse a la reacción de Water Gas Shift (WGS) (ecuación 1) en dos etapas, la primera a alta temperatura (HTS) entre 350°C a 600°C y la segunda a baja temperatura (LTS) entre 150°C a 300°C [5]. Esto permite reducir el contenido de CO, a valores entre 0.2% y 2%.



Si bien la WGS es efectiva para la conversión de CO a CO<sub>2</sub>, es termodinámicamente desfavorable a elevada temperatura [5].

Entre los métodos para reducir aún más el contenido de CO en una corriente rica en H<sub>2</sub> se destaca la *oxidación preferencial de monóxido de carbono* (PROX) (ecuación 2) [3], debido al bajo costo y su sencilla implementación sin pérdidas significativas de hidrógeno [6].



Debiendo evitarse la oxidación de hidrógeno (ecuación (3)) durante el proceso.



Los principales requerimientos que deben cumplir los catalizadores a usarse en PROX son: alta actividad a baja temperatura, esto es, conversión mayor a 99%, a temperaturas de entre la de la WGS a baja temperatura (150 °C-300 °C) y la de la PEMFC (80 °C-100 °C); alta selectividad hacia la de oxidación de CO; y resistencia a la desactivación [1, 7].

El catalizador de platino sobre alúmina (Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) fue propuesto como un efectivo medio para la oxidación selectiva de monóxido de carbono en exceso de hidrógeno por Cohn en 1963 [7]. Varios autores, reportaron que el Pt fue el metal más activo entre varios metales soportados sobre alúmina a temperaturas cercanas a 170 °C [6, 8].

Los catalizadores de cobalto han sido investigados para varias reacciones. Entre ellas PROX, oxidación de hidrocarburos y para la síntesis de Fischer–Tropsch [9]. Los mismos han sido comparados con otros metales de transición para la reacción PROX en presencia de H<sub>2</sub> y han mostrado la actividad más alta a baja temperatura [6, 10].

Los catalizadores de Pt conteniendo un segundo metal, son una alternativa eficiente para mejorar la actividad de los catalizadores de Pt soportados, ya que éstos presentan la desventaja de tener baja actividad a bajas temperaturas (por debajo de 100 °C) [8]. Los sistemas más interesantes para la reacción PROX son aquellos que combinan este metal noble con algún metal fácilmente reducible [2].

En este trabajo se sintetizaron catalizadores de platino, promovidos con cobalto, y se ensayaron en la reacción PROX.

## EXPERIMENTAL

### Preparación del catalizador

El soporte utilizado fue  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con partículas de entre 60 y 100 mesh, previamente calcinado en aire a 500 °C por 4 horas. El platino se agregó mediante impregnación, usando una solución acuosa de ácido hexacloroplatínico (H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>) de concentración tal de proporcionar una carga de 1% p/p. La solución y el soporte se dejaron en contacto por 48 horas para permitir el intercambio iónico entre ambos; luego se quitó el sobrenadante y se secó en estufa a 100°C por 3 horas. Posteriormente, el catalizador se redujo a 500 °C por 20 minutos bajo 20 cm<sup>3</sup>/min de H<sub>2</sub>. A continuación, se lavó en repetidas oportunidades con una solución acuosa de NH<sub>4</sub>OH hasta la total eliminación de cloruros. Finalmente, se secó a 100 °C durante 60 minutos.

El uso de H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub> como precursor se debe a que sobre alúmina se realiza una impregnación con interacción, lo que permite obtener una alta dispersión del metal activo [11]. El agregado de Co para se efectuó por impregnación a volumen de poro de Co(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O mediante solución acuosa. Se dejó reposar por 30 minutos, luego de los cuales se llevó a estufa a 100 °C por 1 hora. Los catalizadores preparados y sus cargas metálicas se detallan a continuación (Tabla 1). En el caso de los catalizadores bimetálicos el Co se agregó sobre el Pt:

**Tabla 1:** Nomenclatura usada en los catalizadores ensayados.

Catalizador	Pt (% p/p)	Co (% p/p)	Co: Pt (at/at)
1Pt	1	0	0
1.5Co	0	0.45	-
4Co	0	1.20	-
1Co1Pt	1	0.30	1
1.5Co1Pt	1	0.45	1.5
2Co1Pt	1	0.60	2
4Co1Pt	1	1.21	4

### Caracterización del catalizador

El área superficial del soporte se obtuvo mediante el método Brunauer-Emmet-Teller (BET), usando un analizador automático Micromeritics ASAP 2020. La adsorción se lleva a cabo a la temperatura de ebullición del N<sub>2</sub> líquido [12]. Antes de la medición, las muestras se someten a vacío durante 24 horas para eliminar sustancias gaseosas en los microporos.

Los patrones de XRD de las muestras se registraron mediante un difractómetro Philips PW 1050/70 usando radiación CuK $\alpha$  ( $\lambda$ =1.517 Å), con un filtro de Ni, una corriente de 20 mA y con 40 kV en el suministro de alto voltaje. Los difractogramas fueron explorados en ángulos de barrido (2 $\theta$ ) de 5° a 70° y escaneando a una velocidad de 2.00°/min.

Los ensayos de Reducción a Temperatura Programada (TPR) se llevaron a cabo utilizando un equipo construido en el laboratorio, sobre 50 mg de muestra, en un reactor de cuarzo de 6 mm de diámetro, desde 20 a 700 °C con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. El caudal de la mezcla reductora fue 10 cm<sup>3</sup>/min, compuesta por 5% en volumen

de H<sub>2</sub> en Ar. El consumo de H<sub>2</sub> fue registrado en una celda de conductividad térmica (TCD) de un cromatógrafo Shimadzu GC-8A.

#### Test catalítico (PROX)

Los ensayos de actividad de fueron realizados sobre 50 mg de catalizador en un reactor de vidrio de 6 mm de diámetro a presión atmosférica. La temperatura de reacción fue registrada mediante una termocupla interna. Los gases de salida del reactor se analizaron mediante dos cromatógrafos gaseosos: uno equipado con un TCD y otro con un detector de ionización de llama (FID). En el cromatógrafo con FID se determinaron CO y CO<sub>2</sub> realizando la separación de los mismos con una columna rellena con Porapak Q de 60/80 mesh, longitud de 3 m y diámetro interno de 3mm, usando H<sub>2</sub> como gas portador, realizando una posterior metanación a 450°C. El cromatógrafo con TCD permitió cuantificar: O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>.

Antes de llevarse a cabo la PROX, es fundamental activar el catalizador [12]. La especie activa del platino es Pt<sup>0</sup>, por esto, el catalizador se redujo desde temperatura ambiente hasta 500°C, a 10 °C/min con un flujo de 60 cm<sup>3</sup>/min de H<sub>2</sub>. Luego se enfrió a 50 °C bajo H<sub>2</sub>. La reacción PROX se llevó a cabo con exceso de hidrógeno y relación estequiométrica O<sub>2</sub>/CO. La composición molar porcentual de la mezcla reactiva fue: O<sub>2</sub>=0.75; N<sub>2</sub>=24.25; CO=1.5; He=13.5; H<sub>2</sub>=60. Los ensayos de actividad se realizaron desde 50 °C hasta 300 °C.

La actividad de los catalizadores puede cuantificarse mediante las ecuaciones 4 a 6 [7].

$$\text{Conversión de CO (\%)} = \frac{[CO]_{\text{Entra}} - [CO]_{\text{Sale}}}{[CO]_{\text{Entra}}} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$\text{Conversión de O}_2 \text{ (\%)} = \frac{[O_2]_{\text{Entra}} - [O_2]_{\text{Sale}}}{[O_2]_{\text{Entra}}} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$\text{Selectividad hacia CO (\%)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{[CO]_{\text{Entra}} - [CO]_{\text{Sale}}}{[O_2]_{\text{Entra}} - [O_2]_{\text{Sale}}} \cdot 100 \quad (\text{Ecuación 6})$$

$[X]_{\text{Entra}}$  y  $[X]_{\text{Sale}}$  son las concentraciones del gas X a entrada y salida, respectivamente.

Debe ser mencionado que la ecuación (6) supone que el CO es convertido en CO<sub>2</sub>, sin que se presenten formación de coque o metano; esta es una suposición adecuada a temperaturas bajas para los catalizadores ensayados [12]. La conversión de CO es fuertemente dependiente de la relación O<sub>2</sub>/CO y la temperatura. El exceso de oxígeno puede mejorar la conversión de CO, pero disminuye la selectividad al oxidar parte del H<sub>2</sub> [1, 6].

La estabilidad se evaluó sobre el catalizador 2:1 CoPt a 125 °C, durante 5 horas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización del catalizador

Las características texturales de  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> son: Área superficial = 252.1 m<sup>2</sup>/g, Volumen de poros = 0.364 cm<sup>3</sup>/g y Tamaño de poros = 57.8 Å.

Se analizaron los patrones XRD del soporte calcinado y de diversos catalizadores. Todas las cargas metálicas de cobalto, fueron muy bajas para generar óxidos metálicos observables [13]. No se observan picos de difracción de Pt, esto también indica que el método de preparación empleado genera cristales metálicos pequeños [12].

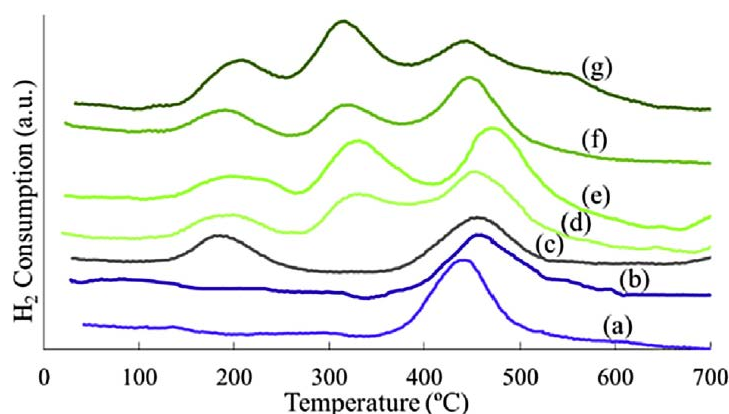
Los gráficos de consumo de H<sub>2</sub> obtenidos en los TPR se muestran en la figura 1. En los catalizadores con Pt podría existir un pico a 400 °C debido a la descomposición de cloruros [14], la cual se descarta debido al tratamiento químico para remoción de los cloruros durante la etapa de preparación. De igual manera, en los catalizadores que contienen Co, se descarta la presencia de picos debido a descomposición de nitratos, ya que la calcinación a 500 °C asegura la descomposición de estas especies, que tiene lugar a 300 °C [15].

Los catalizadores monometálicos de Co presentan un único pico de reducción centrado entre 450-470 °C que puede asignarse a la reducción de Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> a CoO. Se observa que la temperatura de este pico se incrementa cuando aumenta la carga de Co,

esto evidencia un cambio en el grado de interacción entre el metal y el soporte. De acuerdo a la literatura, es posible encontrar otro pico a 600 °C que corresponde a la reducción de diferentes tipos de aluminatos y CoO a cobalto metálico [16].

En el TPR de la muestra de 1Pt se observan dos picos a 185 y a 460 °C. El primero es asignado a la reducción de especies  $PtO_x$  que están interaccionando con átomos de oxígeno presentes en el soporte. Estas especies están relacionadas con la habilidad que posee la alúmina de estabilizar partículas de óxido de Pt. El segundo pico, puede atribuirse a partículas altamente dispersas con una fuerte interacción con el soporte [17,18].

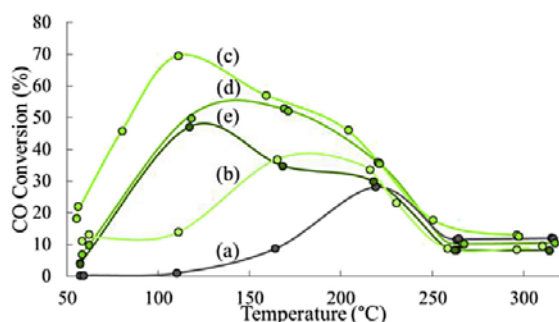
Los catalizadores bimetales muestran 3 picos de consumo de hidrógeno. El primero y tercero corresponden a la reducción de especies Pt, equivalentes a las observadas a temperaturas similares en el catalizador 1Pt. El segundo pico, a temperaturas cercanas a 350 °C se asigna a la reducción de óxidos de cobalto que interacciona con el Pt, que podría indicar la presencia de fase Co-Pt. Además, se observa que este pico aparece a menores temperaturas en comparación con el observado en 1.5Co y 4Co, esto puede deberse a la influencia del platino que produce que disminuya la interacción entre las especies de cobalto con el soporte [19,20]



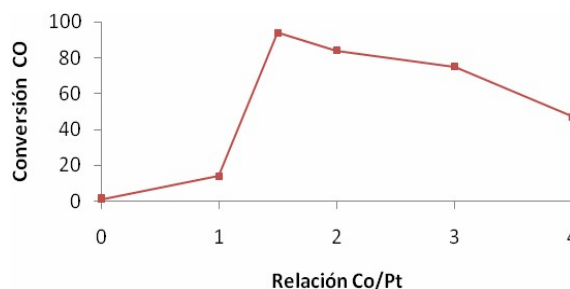
**Figura 1:** Resultado de ensayos TPR de (a) 1.5Co; (b) 4Co; (c) 1Pt; (d) 1Co1Pt; (e) 1.5Co1Pt; (f) 2Co1Pt; (g) 4Co1Pt

### PROX

Los resultados de los ensayos de actividad en la reacción PROX se muestran en la Figura 2. La forma de la curva correspondiente a la conversión de CO sobre el catalizador de Pt/ $Al_2O_3$  es la esperada de acuerdo a experiencias anteriores [2]. A bajas temperaturas, casi no se presenta la reacción de oxidación entre CO y  $O_2$ .



**Figura 2:** Conversión de CO en función de la temperatura para los catalizadores (a) 1Pt; (b) 1Co1Pt; (c) 1.5Co1Pt; (d) 2Co1Pt; (e) 4Co1Pt



**Figura 3:** Efecto de la relación de Co/Pt sobre la conversión de CO<sub>2</sub> en reacción PROX a 110°C.

Termodinámicamente el CO se adsorbe más fuertemente sobre el Pt que el H<sub>2</sub> o el O<sub>2</sub>. Por esto, a baja temperatura, el CO se encuentra cubriendo casi toda la superficie del Pt, impidiendo que otras especies puedan adsorberse. Entonces, el propio CO presenta un efecto de inhibición a bajas temperaturas. Al aumentar la temperatura, a aproximadamente



115 °C, comienza la desorción del CO, dejando sitios libres para que se adsorban el O<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>.

La máxima conversión y selectividad para la reacción PROX se alcanza a los 220 °C, por encima de esta, toma relevancia el aumento en la adsorción y posterior oxidación de H<sub>2</sub>, como así también la WGSR inversa se ve favorecida termodinámicamente. Esto conlleva a una disminución de la conversión de CO y de la selectividad [21,22].

Cuando a los catalizadores de platino se les adicionan ciertos promotores metálicos de elementos de transición, por ejemplo, cobalto, la cinética de la reacción PROX se explica a través de un mecanismo no competitivo de Langmuir-Hinshelwood con dos tipos de sitios activos. Los átomos de oxígeno son adsorbidos disociativamente sobre la superficie del metal promotor en estado de baja oxidación, es decir que activa al O<sub>2</sub>. Igual que en el caso sin promotor, el CO es adsorbido sobre la superficie del Pt y reacciona con los átomos de oxígeno. Esta reacción ocurre en la interfase del catalizador y es selectiva a la oxidación de CO [12].

Un buen promotor debe adoptar fácilmente diferentes estados de oxidación y debe permitir la movilidad de las vacancias de oxígeno [2].

En todos los casos se observa que la adición de cobalto mejora la actividad del catalizador 1Pt. Siendo el catalizador que presenta mejor actividad y selectividad el 1.5Co1Pt.

Para entender la disminución en la actividad de todos los catalizadores a partir de los 200 °C se debe tener en cuenta la presencia de las reacciones secundarias. La reacción entre H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> procede por un mecanismo de Langmuir-Hinshelwood y la adsorción de H<sub>2</sub> está limitada por la velocidad [23]. Adicionalmente, la oxidación de H<sub>2</sub> no es dominante a baja temperatura debido a su alta energía de activación [6].

#### *Efectos de la adición de Co*

En la Figura 3 se observa el efecto de la concentración de cobalto sobre la reacción PROX.

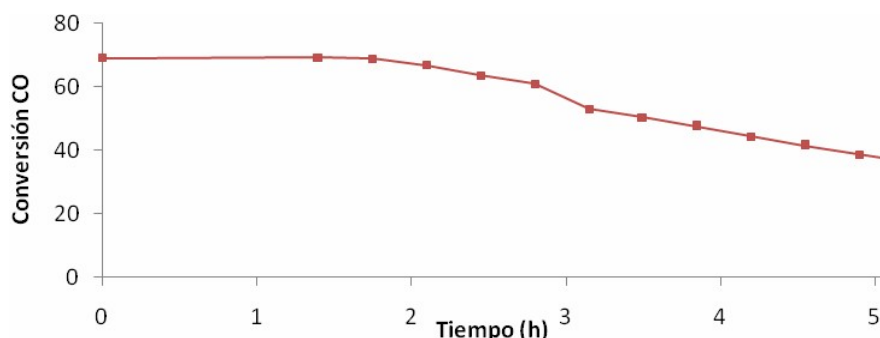
Esta mejora no se observa a la máxima concentración de Co, sino en un punto intermedio, en la relación 1.5 Co/Pt. A relaciones mayores, el Co produce un efecto de bloqueo físico de los sitios activos de Pt [24].

Esto está respaldado por ensayos de quimisorción que indican que el agregado de Co reduce la cantidad de sitios activos en los cuales pueda adsorberse el CO [2]. Entonces, a bajas concentraciones de Co, se observa que la reacción muestra una mejora con respecto al monometálico, porque: presenta sitios activos sobre los cuales adsorberse el O<sub>2</sub> (promotor). Esta mejora en la actividad continúa hasta que la relación 1.5 Co/Pt a partir de la cual, se impide la adsorción física de monóxido porque el cobalto ha bloqueado gran parte de los sitios activos, reduciendo la posibilidad de que se produzca la reacción PROX.

#### *Estabilidad*

En la Figura 4 se presenta el comportamiento del catalizador 2:1 CoPt a temperatura constante de 125°C. Se observa que la conversión de CO comienza a decrecer a medida que se desarrolla la reacción.

Estudios de oxidación de CO indican que a medida que transcurre la reacción, el cobalto, que se halla formando la fase bimetálica Co-Pt, es oxidado durante la misma [25]. Durante la reacción PROX, esta especie provee un oxígeno al CO recuperándolo a partir del O<sub>2</sub> de la fase gaseosa. Entonces, es posible inferir que la pérdida de actividad se debe a cambios en la estabilidad de los óxidos de cobalto formados durante la reacción. Estos óxidos tienen mayor estabilidad, y por lo tanto, menor tendencia a participar en la oxidación selectiva CO [21,22]. Ensayos posteriores demostraron que la actividad es recuperada luego de realizarse un tratamiento de reducción. Luego del mismo, el catalizador recupera la misma actividad que tenía al inicio de la reacción.



**Figura 4:** Ensayos de actividad en PROX para 2:1 CoPt a 125°C.

## CONCLUSIONES

El agregado de cobalto presenta una mejora significativa con respecto al catalizador monometálico de Pt. Esta mejora alcanza su máximo con una relación atómica Co/Pt igual a 1.5. El agregado por encima de la relación Co/Pt igual a 1.5 causa una disminución de la actividad ya que produciría un cubrimiento de los sitios activos del Pt impidiendo la adsorción del CO. Además, para todos los casos bimetálicos, el máximo de conversión se produce alrededor de los 130 °C, este valor se encuentra dentro del rango de trabajo aceptable para este proceso. Un aumento posterior de temperatura genera una disminución en la conversión del monóxido de carbono debido a que a esas temperaturas comienza a ser apreciable la reacción de gas de agua inversa o a que la adsorción de CO ya no es tan fuerte y quedan sitios que libres que son ocupados por el hidrógeno que reacciona para formar agua. Los catalizadores estudiados presentan una leve desactivación luego de varias horas de operación. La actividad original se recupera si son sometidos a un proceso de reducción, lo cual indican que no existe sinterizado durante el transcurso de la reacción.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Z. Zhao, M. Yung, U. Ozkan; *Catal. Communications* 9 (2008) 1465-1471.
- [2] S. Jain, E. Crabb, L. Smart, D. Thompsett, A. Steele; *Appl. Catal. B: Environ.* 89 (2009) 349355.
- [3] H. Li, X. Yu, S. Tu, J. Yan, Z. Wang; *Appl. Catal. A: General* 387 (2010) 215-223.
- [4] C. Kwak, T. Park, D. Suh; *Chemical Engineering Science* 60 (2005) 1211 – 1217.
- [5] Caitlin A. Callaghan; *Kinetics and Catalysis of the Water-Gas-Shift Reaction: A Microkinetic and Graph Theoretic Approach* (2006).
- [6] M. Woods, P. Gawade, B. Tan, U. Ozkan; *Appl. Catal. B: Environ.* 97 (2010) 28-35.
- [7] K. Uğuz, R. Yildirim; *Turk J Chem* 33 (2009) 545-553.
- [8] T. Komatsu, A. Tamura; *Journal of Catalysis* 258 (2008) 306–314.
- [9] P. Thormählen, M. Skoglundh, E. Fridell, B. Andersson; *Journal of Catalysis* 188 (1999) 300310.
- [10] G. Marbán, I. López, T. Valdés-Solís, A. Fuertes; *Intl. Journal of Hydrogen Energy* 33 (2008) 6687-6695.
- [11] M.L. Casella, G.J. Siri, G.F. Santori, O.A. Ferretti, M.M. Ramírez-Corredores, *Langmuir*, 16 (2000,) 5639–5643
- [12] M. Lobera, C. Téllez, J. Herguido, M. Menéndez; *Catal. Today* 157 (2010) 404-409.
- [13] G. Jacobs, E. Chenu, P. Patterson, L. Williams, D. Sparks, G. Thomas, B. Davis; *Appl. Catal. A: General* 258 (2004) 203-214.
- [14] R.M. Navarro, M.C. Álvarez-Galván, M. Cruz Sánchez-Sánchez, F. Rosa, J.L. García Fierro; *Appl. Catal. B Environ.* 55 (2005) 229-241.
- [15] D.I. Enache, M. Roy-Auberger, R. Revel; *Appl. Catal. A General* 268 (2004) 51-60
- [16] L.B. Backman, A. Rautiainen, M. Lindblab, A.O.I Krause; *Appl. Catal. A General* 360 (2009) 183-191
- [17] M.S. Zanuttini, C.D. Lago, C.A. Querini, M.A. Peralta; *Catal. Today* 213 (2013) 9-17
- [18] C. Meephoka, C. Chaisuk, P. Samparnpiboon, P. Prasertthdam; *Catal Commun.* 9 (2008) 546-550

- [19] D.J. Suh, C. Kwak, S.M. Kwon, T.J. Park; *J. Power Sources* 142 (2005) 70-74
- [20] G. Jacobs, T.K. Das, G. Racoillet, B.H. Davis; *Appl. Catal. A: General* 233 (2002) 263-281
- [21] Y. Teng, H. Sakurai, A. Ueda, T. Kobayashi, *Intl. Journal of Hydrogen Energy* 24 (1999) 355-358.
- [22] M.M. Yung, Z. Zhao, M.P. Woods, U.S. Ozkan, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 279 (2008) 1-9.
- [23] C. Kwak, T. Park, D. Suh; *Appl. Catal. A: General* 278 (2005) 181-186.
- [24] Y. Mergler, A. van Aalst, J. van Delft, B.E. Nieuwenhuys; *Appl. Catal. B: Environ.* 10 (1996) 245-261.
- [25] E. Park, D. Lee, H. C. Lee; *Catal. Today* 139 (2009) 280-290.